



TESIS - TE142599

***POWER FLOW MANAGEMENT PADA SISTEM
DISTRIBUSI AKTIF SEIMBANG MENGGUNAKAN
ALGORITMA PFM-CSP DAN PFM-OPF***

NUHA NADHIROH
NRP. 22142012

DOSEN PEMBIMBING
Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTMENT TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017



TESIS - TE142599

***POWER FLOW MANAGEMENT PADA SISTEM
DISTRIBUSI AKTIF SEIMBANG MENGGUNAKAN
ALGORITMA PFM-CSP DAN PFM-OPF***

NUHA NADHIROH
NRP. 22142012

DOSEN PEMBIMBING
PROF. IR. ONTOSENO PENANGSANG, M.SC., PH.D.
DR. RONY SETO WIBOWO, ST., MT.

PROGRAM MAGISTER
BIDANG KEAHLIAN TEKNIK SISTEM TENAGA
DEPARTMENT TEKNIK ELEKTRO
FAKULTAS TEKNOLOGI ELEKTRO
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER
SURABAYA
2017

LEMBAR PENGESAHAN

Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Magister Teknik (M.T)

di

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

oleh:

Nuha Nadhiroh
NRP. 2214201202

Tanggal Ujian : 12 Juni 2017
Periode Wisuda : September 2017

Disetujui oleh:

1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D. (Pembimbing I)
NIP: 194907151974121001
2. Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT. (Pembimbing II)
NIP: 197411292000121001
3. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT. (Penguji)
NIP: 196404051990021001
4. Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng. (Penguji)
NIP: 197309271998031004
5. Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT. (Penguji)
NIP: 198109052005011002



Dekan Fakultas Teknologi Elektro

Dr. Tri Arief Sardjono, S.T., M.T.
NIP: 197002121995121001

Halaman ini sengaja dikosongkan

PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi keseluruhan Tesis saya dengan judul “***POWER FLOW MANAGEMENT PADA SISTEM DISTRIBUSI AKTIF SEIMBANG MENGGUNAKAN ALGORITMA PFM-CSP DAN PFM-OPF***” adalah benar-benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juni 2017

Nuha Nadhiroh

NRP. 2214201202

Halaman ini sengaja dikosongkan

POWER FLOW MANAGEMENT PADA SISTEM DISTRIBUSI AKTIF SEIMBANG MENGGUNAKAN ALGORITMA PFM- CSP DAN PFM-OPF

Nama mahasiswa : Nuha Nadhiroh
NRP : 2214201202
Pembimbing : 1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
2. Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

ABSTRAK

Sistem distribusi telah mengalami banyak perubahan dengan adanya interkoneksi energi terbarukan. Salah satu perubahan yang terjadi adalah perubahan aliran daya dari satu arah (*unidirectional*) menjadi dua arah (*bidirectional*). Sehingga dibutuhkan sebuah metode untuk memonitor dan mengontrol *Distributed Generation* (DG) yang terhubung ke sistem distribusi. Metode yang dapat digunakan adalah *Power Flow Management* (PFM). Pada penelitian ini, terdapat dua algoritma PFM yang telah dikembangkan, yaitu pendekatan PFM yang dimodelkan dengan *Constraint Satisfaction Problem* (CSP) dan PFM yang berdasarkan pada *Optimal Power Flow* (OPF). Kedua pendekatan tersebut diterapkan pada tes sistem radial IEEE 33 bus dan IEEE 69 bus dengan *network states* yang bervariasi. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa kedua algoritma PFM mampu mengatasi kejadian overload pada saluran. Algoritma PFM-OPF menunjukkan performa yang lebih baik dibandingkan PFM-CSP karena mampu mengatasi overload dan memaksimalkan daya output *distributed generator*.

Kata kunci: *Distributed Generation* (DG), *Power Flow Management* (PFM)

Halaman ini sengaja dikosongkan

POWER FLOW MANAGEMENT IN BALANCE ACTIVE DISTRIBUTION NETWORK USING PFM-CSP AND PFM-OPF ALGORITHM

By : Nuha Nadhiroh
Student Identity Number : 2214201202
Supervisor(s) : 1. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D.
2. Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT.

ABSTRACT

The distribution system has become a very complicated network and resulting in new challenges because of Distributed Generation (DG) penetration. A DG alters the power flow of the system from unidirection to bidirectional. This research present Power Flow Management (PFM) method for managing Distributed Generation (DG) units connected to distribution network. The two PFM algorithm were developed in this research. The first PFM approach is modeled as a Constraint Satisfaction Problem (CSP) and the second is based on Optimal Power Flow (OPF). Those two algorithms were implemented to IEEE 33 bus and IEEE 69 bus radial test system by varying the network states. Depending on the network state, PFM-OPF show better performance than PFM-CSP in its ability to remove overloads while minimizing generator curtailment.

Key words: *Distributed Generation (DG), Power Flow Management (PFM)*

Halaman ini sengaja dikosongkan

KATA PENGANTAR

Segala puji syukur kehadiran Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan Tesis ini dengan judul :

***Power Flow Management* pada Sistem Distribusi Aktif Seimbang Menggunakan Algoritma PFM-CSP Dan PFM-OPF**

Tesis ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar Magister Teknik pada bidang keahlian Teknik Sistem Tenaga, Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Allah SWT yang telah memberikan ridho dan berkah-Nya sehingga tesis ini dapat terselesaikan.
2. Kedua orang tua dan keluarga kecil penulis yang selalu berdoa, tanpa henti menyemangati dan menemani dikala melewati masa-masa penting dan sulit, terimakasih untuk kerja kerasnya untuk selalu memberikan yang terbaik untuk penulis.
3. Prof. Ir. Ontoseno Penangsang, M.Sc., Ph.D. dan Dr. Rony Seto Wibowo, ST., MT., selaku dosen pembimbing yang telah banyak memberikan saran serta bimbingan dalam penyelesaian tesis ini.
4. Prof. Dr. Ir. Adi Soeprijanto, MT., Dr. Eng. Ardyono Priyadi, ST., M.Eng., Dr. Dimas Anton Asfani, ST., MT. selaku anggota dewan majelis penguji yang telah memberikan saran dalam penyelesaian tesis ini.
5. Seluruh dosen dan staf pengajar dalam lingkungan Fakultas Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember, khususnya dalam lingkup bidang keahlian Teknik Sistem Tenaga yang telah memberikan ilmu sebagai bekal di masa depan.
6. Keluarga besar Laboratorium PSSSL, Bapak Ibu mahasiswa S3, rekan-rekan mahasiswa S2 dan mahasiswa S1 atas bantuan dan motivasinya.
7. Lembaga Pengelola Dana Pendidikan (LPDP) selaku pemberi beasiswa selama melaksanakan studi S2 hingga terselesaikannya tesis ini.

8. Para senior dan rekan-rekan angkatan 2014 dan 2015 yang telah banyak memberikan dukungan dan bantuan selama menjalani perkuliahan hingga penyelesaian tesis.
9. dan pihak-pihak lain yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu

Semoga Tesis ini bermanfaat bagi pembaca dan masyarakat pada umumnya.

Surabaya, Juni 2017

Penulis

DAFTAR ISI

LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TESIS	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	ix
KATA PENGANTAR	xi
DAFTAR ISI	xiii
DAFTAR GAMBAR	xv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan	3
1.4 Kontribusi	3
BAB 2 KAJIAN PUSTAKA	5
2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik	6
2.2 Analisis Aliran Daya Menggunakan Metode <i>Backward Forward</i>	7
2.3 Power Flow Management (PFM)	9
2.3.1 PFM-OPF	9
2.3.2 PFM-CSP	10
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN	13
3.1 Penerapan Algoritma PFM-OPF	20
3.2 Penerapan Algoritma PFM-CSP	21
3.3 Tes Performa Algoritma PFM-CSP dan PFM-OPF	22
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN	23
4.1 Validasi Metode Backward-Forward pada Sistem Radial	23
4.2 Identifikasi Fenomena Overload	26
4.3 Penerapan Algoritma PFM-CSP	28
4.4 Penerapan Algoritma PFM-OPF	29
4.5 Hasil Tes Performa Algoritma PFM-CSP dan PFM-OPF	30

BAB 5 KESIMPULAN	35
DAFTAR PUSTAKA.....	37
LAMPIRAN	39

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Bagan Penelitian Power Flow Management	6
Gambar 2.2 Single Line Analisis Backward-Forward	8
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	13
Gambar 3.2. Single Line Diagram IEEE 33 Bus	14
Gambar 3.3. Single Line Diagram Sistem IEEE 69 Bus.....	16
Gambar 4.1. Grafik %Error Magnitud Tegangan Hasil Perhitungan dan ETAP..	25
Gambar 4.2. Grafik Selisih Sudut Tegangan Hasil Perhitungan dan ETAP	26
Gambar 4.3. Performa PFM-CSP dan PFM-OPF dalam Mengatasi Overload.....	31
Gambar 4.4. Performa PFM-CSP dan PFM-OPF dalam Memaksimalkan Output DG.....	32
Gambar 4.5. Rata-rata waktu komputasi PFM-CSP dan PFM-OPF untuk Tiap <i>Network States</i>	33

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1. Data Beban IEEE 33 bus.....	14
Tabel 3.2. Data Saluran IEEE 33 bus.....	15
Tabel 3.3. Data Beban Sistem IEEE 69 Bus	16
Tabel 3.4. Data Saluran Sistem IEEE 69 Bus	18
Tabel 4.1. Hasil Validasi Metode Backward Forward dengan ETAP	23
Tabel 4.2 Identifikasi Kondisi yang menyebabkan Overload.....	27
Tabel 4.3 Fenomena Overload pada Sistem IEEE 33 Bus dan IEEE 69 Bus	27
Tabel 4.4 Hasil Penerapan Algoritma PFM-CSP pada Sistem IEEE 33 Bus	28
Tabel 4.5 Hasil Penerapan Algoritma PFM-CSP pada Sistem IEEE 69 Bus	29
Tabel 4.6 Hasil Penerapan Algoritma PFM-OPF pada Sistem IEEE 33 Bus	29
Tabel 4.7 Hasil Penerapan Algoritma PFM-OPF pada Sistem IEEE 69 Bus	30
Tabel 4.8 Hasil Tes Performa Algoritma PFM pada Sistem IEEE 33 Bus.....	30
Tabel 4.9. Hasil Tes Performa Algoritma PFM pada Sistem IEEE 69 Bus.....	31
Tabel 5.1 Perbandingan Performa Algoritma PFM pada Sistem IEEE 33 Bus dan IEEE 69 Bus	35
Tabel L-A. Variabel Acak yang Merepresentasikan Network States	39

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Sistem tenaga listrik secara umum didefinisikan sebagai suatu sistem yang terdiri dari tiga komponen utama, yaitu komponen pembangkitan, saluran transmisi dan saluran distribusi (Saadat, 1999). Salah satu komponen penting dalam sistem tenaga listrik adalah sistem distribusi. Sistem distribusi memiliki karakteristik yang unik, seperti topologi jaringan radial, memiliki nilai perbandingan resistansi dan reaktansi yang tinggi (X/R tinggi), terdapat lateral sistem (dua fasa atau satu fasa), serta beban yang tidak seimbang. Karena karakter tersebut, metode aliran daya seperti *newton raphson* dan *fast decoupled* yang digunakan untuk menganalisis sistem transmisi yang memiliki bus generator tidak dapat diaplikasikan pada sistem distribusi, karena metode-metode tersebut dibangun berdasarkan asumsi sistem tiga fasa seimbang.

Sebagai salah satu upaya untuk memenuhi Protokol Kyoto mengenai emisi gas rumah kaca, interkoneksi sumber energi terbarukan menghasilkan banyak perubahan di sistem distribusi. Perubahan paling besar yang dapat diamati adalah perubahan aliran daya dari *unidirectional* menjadi *bidirectional* (Khushalani, et al., 2007). Hal ini disebabkan penetrasi unit pembangkitan kecil tersebar atau dikenal dengan Distributed Generation (DG) pada sistem distribusi. DG dapat dikategorikan menjadi tiga jenis yaitu DG yang hanya dapat mensuplai daya aktif, DG yang dapat mensuplai daya aktif dan reaktif, dan DG yang mensuplai daya aktif tetapi menyerap daya reaktif. Perubahan sistem distribusi pasif ke aktif akibat penetrasi DG, dapat mengubah bus yang beban menjadi bus generator. Analisis aliran daya dalam sistem distribusi aktif memiliki kemiripan dengan analisis daya pada sistem transmisi yaitu sama-sama terdiri dari 3 jenis bus, bus slack, bus beban dan bus generator.

Peningkatan integrasi DG membutuhkan suatu sistem monitoring dan kontrol untuk mengatur aliran daya aktif dan daya reaktif pada sistem yang dikenal dengan Power Flow Management (PFM). Tujuan utama dari PFM pada distribusi

aktif adalah untuk mengurangi *thermal overloading* atau kejadian overload pada saluran dengan melakukan pembatasan pada output generator yang menyebabkan overload.

Dari penelitian sebelumnya, terdapat dua algoritma PFM yang telah dikembangkan, yaitu pendekatan PFM yang dimodelkan dengan Constraint Satisfaction Problem (CSP) dan PFM yang berdasarkan pada Optimal Power Flow (OPF) (Dolan, et al., 2014). Pada penelitian sebelumnya kedua algoritma PFM ini di implementasikan pada sistem distribusi interkoneksi 33 kV di United Kingdom (UK) dan tes sistem IEEE satu fasa dengan topologi loop.

Pada penelitian ini dikembangkan algoritma PFM-CSP dan PFM-OPF yang mampu diimplementasikan pada sistem distribusi dengan topologi radial. Tes sistem IEEE 33 bus dan sistem IEEE 69 bus dengan penambahan DG digunakan untuk menganalisis performa kedua algoritma tersebut, sehingga dapat diketahui algoritma yang efektif untuk mengatasi kejadian overload pada saluran dan memaksimalkan daya output yang dibangkitkan oleh DG. Algoritma tersebut juga diaplikasikan pada beberapa *network state* yang bervariasi.

1.2 Rumusan Masalah

Permasalahan yang akan diselesaikan dalam penelitian ini yaitu bagaimana penggunaan algoritma PFM yang efektif dalam mengurangi overload pada saluran dan memaksimalkan daya output generator pada *network states* yang bervariasi. Beberapa batasan dalam penelitian ini adalah:

1. Monitoring dilakukan melalui simulasi
2. Indeks performa kedua algoritma PFM pada penelitian ini yang diukur adalah kemampuan PFM-OPF dan PFM-CSP dalam mengurangi overload pada saluran dan memaksimalkan daya output DG

1.3 Tujuan

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui penggunaan algoritma PFM yang efektif mengurangi overload pada saluran dan memaksimalkan daya output generator pada *network states* yang bervariasi.

1.4 Kontribusi

Mengacu pada penelitian sebelumnya mengenai *Power Flow Management* (PFM) yang dilakukan pada sistem loop satu fasa, maka pada penelitian ini PFM digunakan pada sistem distribusi radial satu fasa dengan pendekatan algoritma PFM-CSP menggunakan metode *generate and test*.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 2

KAJIAN PUSTAKA

Peningkatan integrasi DG (*Distributed Generation*) pada sistem dapat menyebabkan perubahan aliran daya dari *unidirectional* menjadi *bidirectional*. DG dapat dikategorikan menjadi tiga jenis yaitu DG yang hanya dapat mensuplai daya aktif, DG yang dapat mensuplai daya aktif dan reaktif, dan DG yang mensuplai daya aktif tetapi menyerap daya reaktif. Perubahan sistem distribusi pasif ke aktif akibat penetrasi DG, dapat mengubah bus yang beban menjadi bus generator. Analisa aliran daya dalam sistem distribusi aktif memiliki kemiripan dengan analisis daya pada sistem transmisi yaitu sama-sama terdiri dari 3 jenis bus, bus slack, bus beban dan bus generator. Analisa aliran daya dengan mempertimbangkan DG perlu dilakukan dengan mengembangkan metode aliran daya yang telah ada.

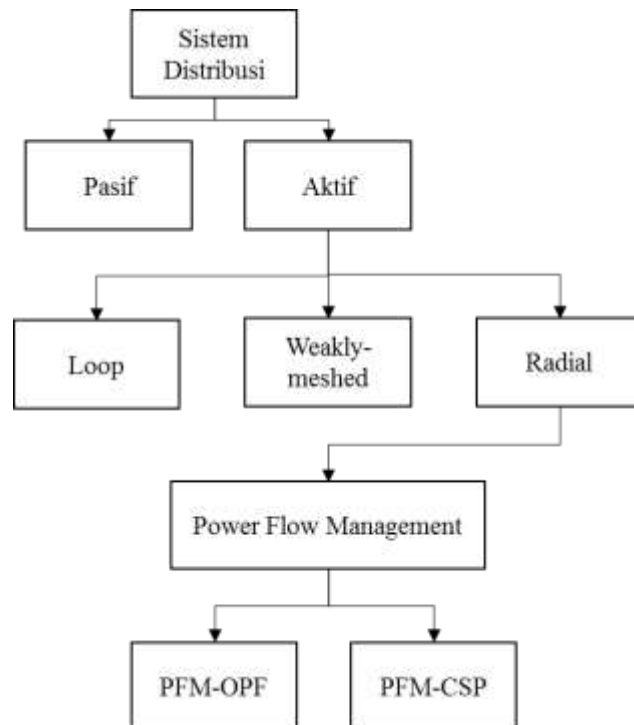
GW Chang dan SY Chu mengembangkan metode *Backward/Forward Sweep* untuk melakukan load flow pada sistem distribusi radial (Chang, et al., 2007). Metode *Backward/Forward Sweep* merupakan metode analisis aliran daya dengan menggunakan prinsip hukum Kirchoff yang terdiri dari dua langkah perhitungan dalam menghitung nilai tegangan dalam sistem distribusi radial.

T-H Chen dan N-C Yang menjelaskan tentang metode Zbr untuk sistem distribusi radial yang tidak seimbang (Cheng T-H., 2009). Metode Zbr digunakan untuk membentuk persamaan aliran daya dengan menyusun impedansi saluran distribusi radial. Metode Zbr dapat menghitung drop tegangan pada sistem distribusi.

Terdapat beberapa algoritma PFM yang menunjukkan DG yang akan dibatasi dan jumlah pembatasan output yang dilakukan. Dolan et al menjelaskan bahwa salah satu solusinya adalah dengan memformulasikan PFM sebagai sebuah permasalahan OPF (*Optimal Power Flow*) (Dolan, et al., 2014). OPF dilakukan untuk memaksimalkan penjumlahan linear output DG (dengan meminimalkan pembatasan yang dilakukan pada output DG) dengan tetap memenuhi *constraint* OPF terkait dengan keseimbangan daya, output generator maksimum dan rating cabang.

Pada penelitian selanjutnya, Dolan et al juga menjelaskan konsep PFM sebagai *constraint satisfaction problem* (CSP) (Dolan, et al., 2014). Sebuah solusi dari CSP adalah saat sejumlah variabel V yang merupakan anggota himpunan D dan juga memenuhi batasan C . V adalah limit output DG, D menunjukkan pengoperasian DG dan C merupakan sebuah *constraint* dimana nilai limit output DG yang digunakan tidak boleh menyebabkan overload.

James King et al, menunjukkan bahwa tidak ada algoritma yang paling efektif untuk mengurangi overload dan memaksimalkan daya output DG pada semua *network states* (James King, 2014). Sehingga muncul potensi untuk meningkatkan performa PFM dengan melakukan pemilihan algoritma yang cocok untuk masing-masing *network states*. Bagan penelitian PFM pada sistem distribusi ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Bagan Penelitian Power Flow Management

2.1 Sistem Distribusi Tenaga Listrik

Sistem tenaga listrik secara umum didefinisikan sebagai suatu sistem yang terdiri dari empat komponen utama, yaitu komponen pembangkitan, saluran transmisi dan saluran distribusi dan beban (Saadat, H., 2004). Daya listrik yang

dihasilkan dari pembangkit disalurkan melalui jaringan transmisi dan distribusi sehingga sampai ke beban. Sistem jaringan distribusi digunakan untuk menyalurkan energi listrik berdaya besar menuju ke konsumen atau pemakai energi listrik. Karakteristik dari sistem distribusi adalah sebagai berikut :

- a. Mempunyai ratio R/X yang tinggi.
- b. Jauh dari pembangkit.
- c. Memiliki banyak cabang atau saluran.

2.2 Analisis Aliran Daya Menggunakan Metode *Backward Forward*

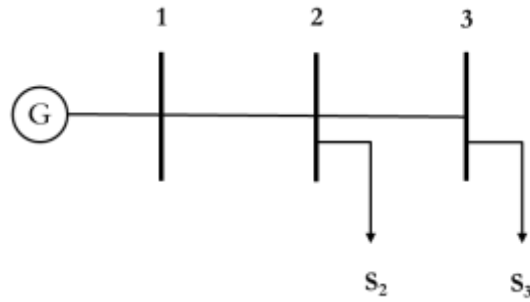
Analisis aliran daya merupakan komponen penting dalam analisis dan perancangan sistem daya. Analisa aliran daya dibutuhkan untuk perencanaan, monitoring operasi, penjadwalan ekonomis dan sebagainya. Dalam analisis ini dilakukan perhitungan magnitude tegangan pada bus, sudut fasa, aliran daya pada saluran transmisi, rugi saluran dan injeksi daya pada semua bus (Saadat, 1999).

Terdapat empat besaran yang terkait dengan masing-masing bus pada sistem daya. Magnitude tegangan $|V|$, sudut fasa δ , daya aktif P dan daya reaktif Q . Dalam analisis aliran daya, pada setiap bus hanya diketahui 2 besaran, sedangkan 2 besaran lainnya harus dicari melalui perhitungan. Secara umum, bus dapat diklasifikasikan menjadi tiga jenis, yaitu:

- a. *Slack/Swing Bus*, digunakan sebagai bus referensi dimana magnitud tegangan $|V|$ dan sudut fasa δ diketahui.
- b. *Load Bus*, atau bus beban (P - Q bus), pada bus ini besarnya daya aktif P dan daya reaktif Q diketahui.
- c. *Generator Bus*, atau bus generator (P - $|V|$ bus), pada bus ini besarnya daya aktif P dan magnitud tegangan $|V|$ diketahui.

Sistem distribusi memiliki karakteristik yang berbeda dengan sistem transmisi sehingga dibutuhkan analisis aliran daya khusus. Beberapa penelitian dan pemodelan matematis sistem distribusi telah dikembangkan, salah satunya adalah metode *backward-forward* (Chang, et al., 2007). Metode tersebut merupakan metode analisis aliran daya dengan menggunakan prinsip hukum Kirchhoff, dimana dilakukan dua langkah perhitungan. Langkah pertama adalah menghitung besar arus yang mengalir pada setiap cabang dimulai dari beban terujung hingga menuju

infinite bus (metode *forward*). Kemudian arus yang mengalir pada setiap cabang dikalikan dengan impedansi saluran untuk mendapatkan besarnya drop tegangan. Dengan melakukan perhitungan drop tegangan maka tegangan pada setiap bus distribusi dapat diketahui. Contoh rangkaian sederhana untuk perhitungan analisis aliran daya menggunakan metode *backward-forward* ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.2 Single Line Analisis Backward-Forward

Diketahui tegangan generator V_g dan impedansi saluran Z_{12} & Z_{23} dengan beban S_2 dan S_3 . Arus yang mengalir pada tiap cabang dapat dihitung menggunakan persamaan:

$$I_3 = \left(\frac{S_3}{V_3}\right)^* \quad \text{dan} \quad I_2 = \left(\frac{S_2}{V_2}\right)^* \quad (2.1)$$

Tegangan pada bus 2 dan bus 1 dapat dihitung melalui persamaan:

$$V_2 = V_3 + Z_{23}I_{23} \quad (2.2)$$

$$V_1 = V_2 + Z_{12}I_{12} \quad (2.3)$$

$$V_1 = V_2 + Z_{12}(I_{23} + I_2) \quad (2.4)$$

Perhitungan error digunakan untuk melakukan cek konvergensi,

$$Error = \left| |V_1| - |V_g| \right| \quad (2.5)$$

Setelah dilakukan perhitungan tegangan, kemudian dilanjutkan dengan langkah analisis berikutnya yaitu metode *backward*. Dengan menghitung kembali besarnya drop tegangan menggunakan besarnya arus yang didapatkan dari metode sebelumnya. Perhitungan awal dimulai dengan menghitung tegangan pada titik paralel pertama yaitu V_2 . Proses perhitungan diulang hingga error perhitungan kurang dari nilai toleransi yang telah dilakukan. Validasi metode backward-forward yang digunakan pada sistem radial akan dijelaskan pada bab pembahasan.

2.3 Power Flow Management (PFM)

Active Network Management (ANM) adalah sebuah filosofi untuk pengoperasian sistem distribusi dengan mempertimbangkan penetrasi DG. Tujuan dari ANM adalah untuk memaksimalkan kemampuan jaringan untuk menggunakan renewable DG. Salah satu teknologi yang terkait dengan ANM adalah *generation curtailment* (pembatasan output generator) (Gill, et al., 2014).

Pada strategi “*fit-and-forget*”, limit kapasitas DG telah ditentukan sejak awal untuk memenuhi konstrain aliran daya sistem pada kondisi tidak terjadi gangguan. “*Firm connection*” DG dapat beroperasi setiap saat pada level output apapun. Sedangkan pada skema ANM digunakan untuk mengakomodir koneksi DG yang bersifat “*non-firm*”. Skema ANM merupakan bentuk komunikasi dan kontrol untuk mengizinkan “*non-firm connection*” DG yang terhubung sesuai dengan kebutuhan, nantinya akan dilakukan pembatasan pada output DG sesuai instruksi dari DNO (*Distribution Network Operator*). Pembatasan dilakukan untuk menghindari pelanggaran konstrain aliran daya. Hal ini sangat mungkin terjadi ketika permintaan daya rendah dan output dari “*firm connection*” DG tinggi. Pada kondisi ini, keadaan *network branch* akan mendekati kapasitas penuhnya, sehingga tidak ada kapasitas saluran yang tersisa untuk menambahkan DG.

Salah satu aplikasi dari ANM adalah *Power Flow Management* (PFM). Peningkatan integrasi DG (*Distributed Generation*) pada sistem dapat menyebabkan perubahan aliran daya dari *unidirectional* menjadi *bidirectional*. Perubahan ini membutuhkan suatu sistem *monitoring* dan *control strategy* untuk mengatur aliran daya aktif dan daya reaktif pada sistem yang dikenal dengan Power Flow Management (PFM). Tujuan utama dari PFM pada distribusi aktif adalah untuk mengurangi overload pada saluran dengan melakukan pembatasan pada output DG yang menyebabkan overload. PFM dapat dimodelkan sebagai sebuah permasalahan OPF dan CSP (King, et al., 2015).

2.3.1 PFM-OPF

Optimal power flow (OPF) adalah sebuah teknik yang digunakan pada pengoperasian dan perencanaan sistem daya yang dapat diformulasikan sebagai permasalahan optimasi (Dolan, et al., 2012). Pada umumnya, OPF digunakan untuk

meminimalisasi biaya operasi sistem, pada penelitian ini OPF digunakan untuk memaksimalkan jumlah output DG dengan cara meminimalkan jumlah pembatasan output DG yang diformulasikan sebagai berikut:

$$\min_{P_g, Q_g, V, \delta} \sum_{n=1}^N \pi_{gi}(P_{gi}) \quad (2.6)$$

Dengan batasan:

- Persamaan Keseimbangan Daya

$$P_{gi} - P_{di} = P_i(V, \delta) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{lines}} P_{ij}(V, \delta) \quad (2.7)$$

$$Q_{gi} - Q_{di} = Q_i(V, \delta) = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^{N_{lines}} Q_{ij}(V, \delta) \quad (2.8)$$

- Limit Generator

$$P_{gi}^{min} \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{max} \quad (2.9)$$

$$Q_{gi}^{min} \leq Q_{gi} \leq Q_{gi}^{max} \quad (2.10)$$

- Limit Thermal

$$|S_{ij}| \leq S_{ij}^{max} \quad (2.11)$$

Dengan π_{gi} adalah konstanta urutan generator, P_{gi} dan Q_{gi} adalah daya aktif dan daya reaktif output generator pada bus i , P_{di} dan Q_{di} adalah permintaan daya aktif dan daya reaktif pada bus i , P_{gi}^{max} , P_{gi}^{min} , Q_{gi}^{max} , Q_{gi}^{min} adalah batas atas dan bawah daya aktif dan daya reaktif unit generator, P_{ij} dan Q_{ij} adalah daya aktif dan reaktif yang mengalir antara saluran i dan j , S_{ij}^{max} adalah limit daya thermal antara bus i dan bus j .

2.3.2 PFM-CSP

Dalam bahasa umum constraint satisfaction problem adalah sebuah masalah dengan sebuah himpunan variabel dengan jumlah berhingga, masing-masing diasosiasikan dengan sebuah domain dengan jumlah anggota yang berhingga juga, dan sebuah himpunan constraint yang membatasi nilai yang dapat diambil oleh variabel-variabel ini secara bersamaan.

Pada PFM, diasumsikan bahwa permasalahan yang harus diselesaikan adalah penentuan aksi kontrol yang dibutuhkan untuk menjaga aliran daya di bawah batas limit thermal yang diijinkan pada saluran. Pemodelan CSP pada PFM dapat diformulasikan sebagai berikut:

$$(V_{gen}, D_{gen}, C) \quad (2.12)$$

- Himpunan variable V : sebuah himpunan dari variabel-variabel dengan jumlah berhingga x_1, x_2, \dots, x_n , masing-masing variable merepresentasikan jumlah DG yang terhubung pada sistem.
- D adalah sebuah fungsi yang memetakan setiap variabel pada Z ke sebuah himpunan dari objek-objek:

$D: Z \rightarrow$ himpunan objek-objek dengan jumlah berhingga (jenis apapun). Disebut D_{x_i} , sebagai himpunan dari objek-objek yang dipetakan dari x_i oleh D . Objek-objek ini adalah nilai-nilai yang mungkin bagi x_i dan himpunan D_{x_i} , sebagai domain x .

Himpunan domain, D , pada PFM memiliki elemen nilai yang akan diambil oleh variable. $D\{0\%, 50\%, 100\%\}$ yang menunjukkan limit output DG.

- Himpunan constraint, C : yang diaplikasikan pada nilai variabel. Nilai limit output DG yang dipilih tidak boleh menyebabkan overload.

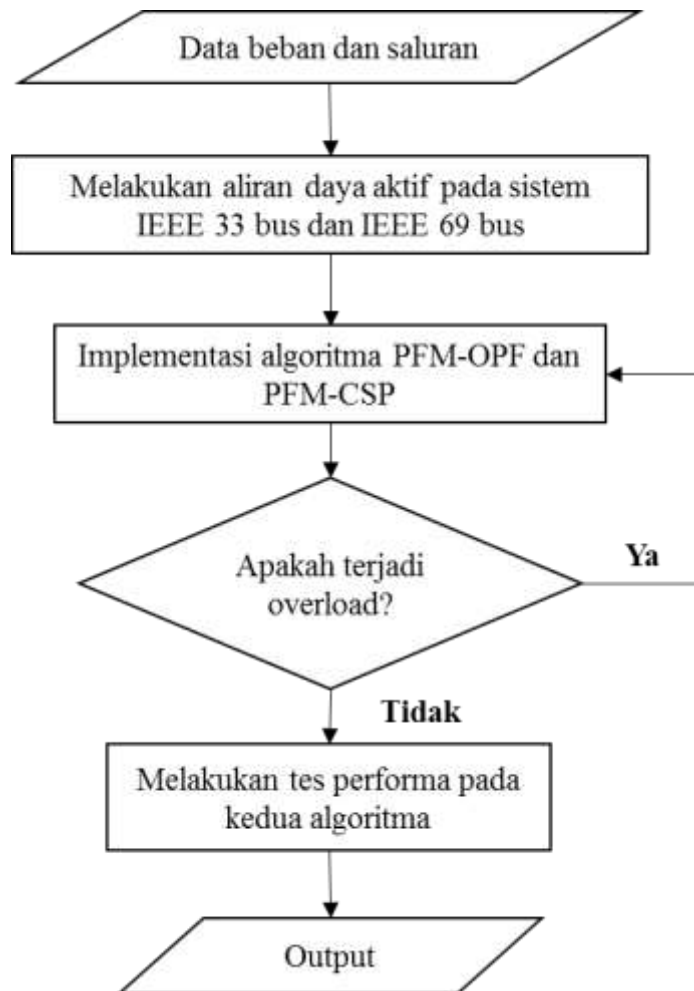
Sebuah *constraint satisfaction problem* dapat diselesaikan menggunakan algoritma pencarian sistematis *generate and test*. Algoritma *generate and test* termasuk dalam algoritma *depth-first search* (Bacchus, 2010). Pada awalnya, semua variabel diberi nilai, kemudian algoritma ini akan menguji apakah kombinasi nilai memenuhi semua *constraint* yang ada. Jika tidak maka nilai variabel yang paling akhir yang akan berubah, begitu seterusnya. Jumlah kombinasi yang dicoba oleh algoritma ini sama dengan ukuran produk cartesian semua domain variabel, sehingga didapatkan solusi lengkap,

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 3

METODOLOGI PENELITIAN

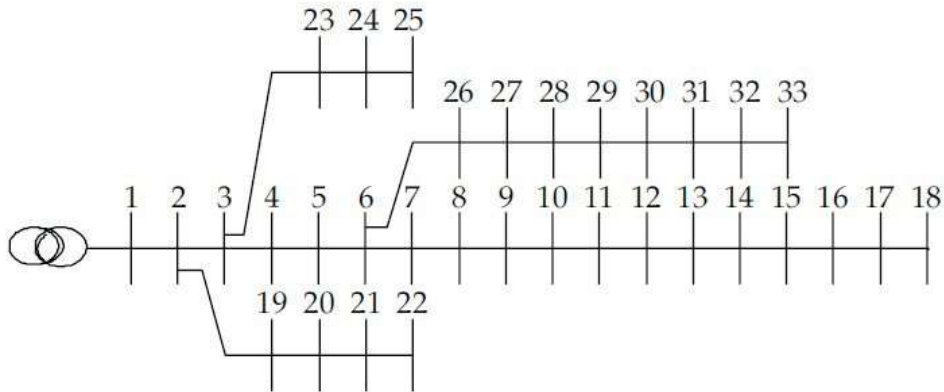
Penelitian dimulai dari mendapatkan data beban dan saluran yang akan digunakan untuk mendesain aliran daya aktif seimbang. Langkah – langkah penelitian terperinci dibuat dalam diagram alir sesuai Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

Pemodelan sistem distribusi yang digunakan adalah sistem IEEE 33 bus dan sistem IEEE 69 bus radial yang telah dimodifikasi dengan penambahan DG. Rating DG ditentukan sehingga dapat menyebabkan overload pada saluran. Fenomena overload diidentifikasi ketika terjadi penambahan injeksi DG ke sistem pada saat beban tetap dan beban bertambah. Gambar 3.2 dan Gambar 3.3

menunjukkan sistem yang digunakan. Data beban dan data saluran sistem tersebut ditunjukkan pada Tabel 3.1 hingga Tabel 3.4.



Gambar 3.2. Single Line Diagram IEEE 33 Bus

Tabel 3.1. Data Beban IEEE 33 bus

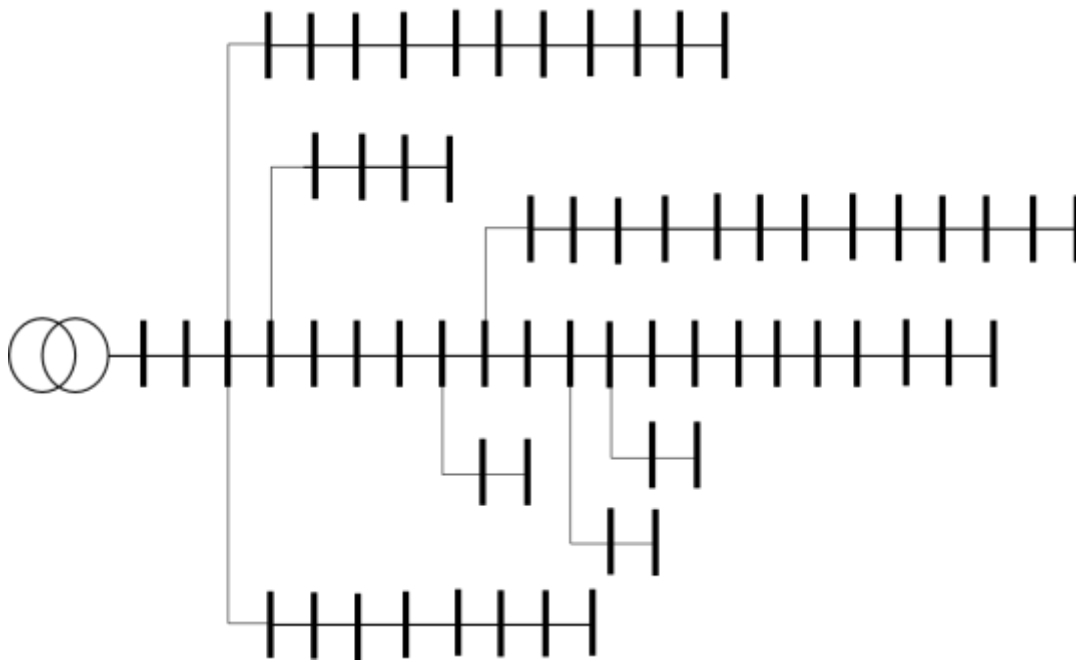
Bus	Type	Pd	Qd	Base kV	zone	Vmax	Vmin
1	3	0	0	12,66	1	1	0,9
2	1	0,1	0,06	12,66	1	1	0,9
3	1	0,09	0,04	12,66	1	1	0,9
4	1	0,12	0,08	12,66	1	1	0,9
5	1	0,06	0,03	12,66	1	1	0,9
6	1	0,06	0,02	12,66	1	1	0,9
7	1	0,2	0,1	12,66	1	1	0,9
8	1	0,2	0,1	12,66	1	1	0,9
9	1	0,06	0,02	12,66	1	1	0,9
10	1	0,06	0,02	12,66	1	1	0,9
11	1	0,045	0,03	12,66	1	1	0,9
12	1	0,06	0,035	12,66	1	1	0,9
13	1	0,06	0,035	12,66	1	1	0,9
14	1	0,12	0,08	12,66	1	1	0,9
15	1	0,06	0,01	12,66	1	1	0,9
16	1	0,06	0,02	12,66	1	1	0,9
17	1	0,06	0,02	12,66	1	1	0,9
18	1	0,09	0,04	12,66	1	1	0,9
19	1	0,09	0,04	12,66	1	1	0,9
20	1	0,09	0,04	12,66	1	1	0,9
21	1	0,09	0,04	12,66	1	1	0,9
22	1	0,09	0,04	12,66	1	1	0,9

Bus	Tipe	Pd	Qd	baseKV	zone	Vmax	Vmin
23	1	0,09	0,05	12,66	1	1	0,9
24	1	0,42	0,2	12,66	1	1	0,9
25	1	0,42	0,2	12,66	1	1	0,9
26	1	0,06	0,025	12,66	1	1	0,9
27	1	0,06	0,025	12,66	1	1	0,9
28	1	0,06	0,02	12,66	1	1	0,9
29	1	0,12	0,07	12,66	1	1	0,9
30	1	0,2	0,6	12,66	1	1	0,9
31	1	0,15	0,07	12,66	1	1	0,9
32	1	0,21	0,1	12,66	1	1	0,9
33	1	0,06	0,04	12,66	1	1	0,9

Tabel 3.2. Data Saluran IEEE 33 bus

Saluran		Impedansi	
Bus	Bus	R	X
1	2	0,0922	0,0470
2	3	0,4930	0,2511
3	4	0,3660	0,1864
4	5	0,3811	0,1941
5	6	0,8190	0,7070
6	7	0,1872	0,6188
7	8	0,7114	0,2351
8	9	1,0300	0,7400
9	10	1,0440	0,7400
10	11	0,1966	0,0650
11	12	0,3744	0,1238
12	13	1,4680	1,1550
13	14	0,5416	0,7129
14	15	0,5910	0,5260
15	16	0,7463	0,5450
16	17	1,2890	1,7210
17	18	0,7320	0,5740
2	19	0,1640	0,1565
19	20	1,5042	1,3554
20	21	0,4095	0,4784
21	22	0,7089	0,9373
3	23	0,4512	0,3083
23	24	0,8980	0,7091
24	25	0,8960	0,7011

Saluran		Impedansi	
Bus	Bus	R	X
6	26	0,2030	0,1034
26	27	0,2842	0,1447
27	28	1,0590	0,9337
28	29	0,8042	0,7006
29	30	0,5075	0,2585
30	31	0,9744	0,9630
31	32	0,3105	0,3619
32	33	0,3410	0,5302



Gambar 3.3. Single Line Diagram Sistem IEEE 69 Bus

Tabel 3.3. Data Beban Sistem IEEE 69 Bus

Bus	Tipe	Pd	Qd	Base kV	zone	Vmax	Vmin
1	3	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
2	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
3	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
4	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
5	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
6	1	0,0026	0,0022	12,66	1	1,00	0,90
7	1	0,0404	0,0300	12,66	1	1,00	0,90
8	1	0,0750	0,0540	12,66	1	1,00	0,90
9	1	0,0300	0,0220	12,66	1	1,00	0,90
10	1	0,0280	0,0190	12,66	1	1,00	0,90

Bus	Tipe	Pd	Qd	Base kV	zone	Vmax	Vmin
11	1	0,1450	0,1040	12,66	1	1,00	0,90
12	1	0,1450	0,1040	12,66	1	1,00	0,90
13	1	0,0080	0,0055	12,66	1	1,00	0,90
14	1	0,0080	0,0055	12,66	1	1,00	0,90
15	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
16	1	0,0455	0,0300	12,66	1	1,00	0,90
17	1	0,0600	0,0350	12,66	1	1,00	0,90
18	1	0,0600	0,0350	12,66	1	1,00	0,90
19	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
20	1	0,0010	0,0006	12,66	1	1,00	0,90
21	1	0,1140	0,0810	12,66	1	1,00	0,90
22	1	0,0053	0,0035	12,66	1	1,00	0,90
23	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
24	1	0,0280	0,0200	12,66	1	1,00	0,90
25	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
26	1	0,0140	0,0100	12,66	1	1,00	0,90
27	1	0,0140	0,0100	12,66	1	1,00	0,90
28	1	0,0260	0,0186	12,66	1	1,00	0,90
29	1	0,0260	0,0186	12,66	1	1,00	0,90
30	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
31	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
32	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
33	1	0,0140	0,0100	12,66	1	1,00	0,90
34	1	0,0195	0,0140	12,66	1	1,00	0,90
35	1	0,0060	0,0040	12,66	1	1,00	0,90
36	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
37	1	0,0790	0,0564	12,66	1	1,00	0,90
38	1	0,3847	0,2745	12,66	1	1,00	0,90
39	1	0,3847	0,2745	12,66	1	1,00	0,90
40	1	0,0405	0,0283	12,66	1	1,00	0,90
41	1	0,0036	0,0027	12,66	1	1,00	0,90
42	1	0,0044	0,0035	12,66	1	1,00	0,90
43	1	0,0264	0,0190	12,66	1	1,00	0,90
44	1	0,0240	0,0172	12,66	1	1,00	0,90
45	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
46	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
47	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
48	1	0,1000	0,0720	12,66	1	1,00	0,90
49	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
50	1	1,2440	0,8880	12,66	1	1,00	0,90
51	1	0,0320	0,0230	12,66	1	1,00	0,90
52	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90

Bus	Tipe	Pd	Qd	Base kV	zone	Vmax	Vmin
53	1	0,2270	0,1620	12,66	1	1,00	0,90
54	1	0,0590	0,0420	12,66	1	1,00	0,90
55	1	0,0180	0,0130	12,66	1	1,00	0,90
56	1	0,0180	0,0130	12,66	1	1,00	0,90
57	1	0,0280	0,0200	12,66	1	1,00	0,90
58	1	0,0280	0,0200	12,66	1	1,00	0,90
59	1	0,0260	0,0186	12,66	1	1,00	0,90
60	1	0,0260	0,0186	12,66	1	1,00	0,90
61	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
62	1	0,0240	0,0170	12,66	1	1,00	0,90
63	1	0,0240	0,0170	12,66	1	1,00	0,90
64	1	0,0012	0,0010	12,66	1	1,00	0,90
65	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
66	1	0,0060	0,0043	12,66	1	1,00	0,90
67	1	0,0000	0,0000	12,66	1	1,00	0,90
68	1	0,0392	0,0263	12,66	1	1,00	0,90
69	1	0,0392	0,0263	12,66	1	1,00	0,90

Tabel 3.4. Data Saluran Sistem IEEE 69 Bus

Saluran		Impedansi	
Bus	Bus	R	X
1	2	0,0005	0,0012
2	3	0,0005	0,0012
3	4	0,0015	0,0036
4	5	0,0251	0,0294
5	6	0,3660	0,1864
6	7	0,3811	0,1941
7	8	0,0922	0,0470
8	9	0,0493	0,0251
9	10	0,8190	0,2707
10	11	0,1872	0,0619
11	12	0,7114	0,2351
12	13	1,0300	0,3400
13	14	1,0440	0,3450
14	15	1,0580	0,3496
15	16	0,1966	0,0650
16	17	0,3744	0,1238
17	18	0,0047	0,0016
18	19	0,3276	0,1083
19	20	0,2106	0,0696

Saluran		Impedansi	
Bus	Bus	R	X
20	21	0,3416	0,1129
21	22	0,0140	0,0046
22	23	0,1591	0,0526
23	24	0,3463	0,1145
24	25	0,7488	0,2475
25	26	0,3089	0,1021
26	27	0,1732	0,0572
3	28	0,0044	0,0108
28	29	0,0640	0,1565
29	30	0,3978	0,1315
30	31	0,0702	0,0232
31	32	0,3510	0,1160
32	33	0,8390	0,2816
33	34	1,7080	0,5646
34	35	1,4740	0,4873
4	36	0,0034	0,0084
36	37	0,0851	0,2083
37	38	0,2898	0,7091
38	39	0,0822	0,2011
8	40	0,0928	0,0473
40	41	0,3319	0,1114
9	42	0,1740	0,0886
42	43	0,2030	0,1034
43	44	0,2842	0,1447
44	45	0,2813	0,1433
45	46	1,5900	0,5337
46	47	0,7837	0,2630
47	48	0,3042	0,1006
48	49	0,3861	0,1172
49	50	0,5075	0,2585
50	51	0,0974	0,0496
51	52	0,1450	0,0738
52	53	0,7105	0,3619
53	54	1,0410	0,5302
11	55	0,2012	0,0611
55	56	0,0047	0,0014
12	57	0,7394	0,2444
57	58	0,0047	0,0016
3	59	0,0044	0,0108
59	60	0,0640	0,1565

Saluran		Impedansi	
Bus	Bus	R	X
60	61	0,1053	0,1230
61	62	0,0304	0,0355
62	63	0,0018	0,0021
63	64	0,7283	0,8509
64	65	0,3100	0,3623
65	66	0,0410	0,0478
66	67	0,0092	0,0116
67	68	0,1089	0,1373
68	69	0,0009	0,0012

3.1 Penerapan Algoritma PFM-OPF

Power Flow Management (PFM) dapat dilakukan menggunakan pendekatan formulasi OPF, dengan biaya pembangkitan masing-masing unit DG merepresentasikan urutan koneksi DG. DG dengan biaya tertinggi adalah DG yang paling akhir terkoneksi dengan grid. Formulasi OPF tersebut mampu mengadopsi prinsip LIFO (Last-in First-out), sehingga algoritma OPF akan melakukan pembatasan daya output pada generator yang paling akhir terkoneksi dengan grid.

Algoritma OPF yang digunakan untuk melakukan PFM didasarkan pada persamaan 2.6 sampai 2.11. Perubahan hanya dilakukan pada definisi dan formula biaya pembangkitan DG, $\pi_{gi}(P_{gi})$, pada fungsi objektif 2.24. Pada formulasi OPF biasa, $\pi_{gi}(P_{gi})$ menunjukkan biaya pembangkitan masing-masing generator. Sedangkan pada algoritma PFM-OPF, formula tersebut menunjukkan urutan koneksi generator ke grid. Oleh karena itu, masing-masing generator memiliki nilai fungsi biaya sebagai berikut:

$$\pi_{gi}(P_{gi}) = \Omega_{gi}(P_{gi}) \quad (3.1)$$

Hal ini menunjukkan bahwa DG dengan biaya pembangkitan yang paling rendah menunjukkan bahwa DG tersebut adalah DG yang pertama kali terkoneksi dengan grid. Konstanta pada persamaan 3.1 bukan menunjukkan biaya aktual pembangkitan DG.

3.2 Penerapan Algoritma PFM-CSP

Untuk memodelkan permasalahan power flow management sebagai sebuah CSP, permasalahan tersebut harus dinyatakan sebagai sebuah himpunan variabel dengan domain yang berhingga dan sebuah himpunan constraints. Pada PFM dapat diasumsikan bahwa permasalahan yang harus diselesaikan adalah memutuskan aksi kontrol apakah yang harus di ambil untuk menjaga aliran daya pada sistem dalam batas thermal.

Variabel CSP adalah himpunan unit distributed generator (DG) dan domain CSP adalah himpunan nilai diskrit berhingga yang merepresentasikan nilai maximum output DG yang ditentukan. Masing-masing DG memiliki nilai curtailment sebagai domainnya, misalnya $D_{DG_i} = \{1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2; 0\}$. Nilai 1 menunjukkan bahwa generator beroperasi tanpa curtailment dan 0 menunjukkan bahwa DG tidak beroperasi.

Permasalahan PFM yang dimodelkan sebagai CSP dapat direpresentasikan sebagai berikut:

$$(V_{gens}, D_{Control\ Signal}, C) \quad (3.2)$$

Dengan:

$$V_{gens} = \{Gen_1, Gen_2, \dots, Gen_n\}$$

$D_{Control\ Signal}$:

$$D_{Gen_1} = \{1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2; 0\}, D_{Gen_2} = \{1; 0,8; 0,6; 0,4; 0,2; 0\}, dst$$

C adalah constraint yang berlaku untuk himpunan variabel:

$$C_{PF} = \{|S_{ij}| \leq S_{ij}^{max}\} \quad (3.3)$$

$$C_{DG} = \{k, l, m\} \quad (3.4)$$

$$C_{maxDG} = \left\{ \max \sum_{n=1}^N P_{Gi} \right\} \quad (3.5)$$

Dengan S_{ij} adalah aliran daya pada saluran yang berkaitan dengan aliran daya maksimum pada saluran, S_{ij}^{max} ; k, l, m adalah nilai integer yang mengindikasikan urutan koneksi DG $Gen_1, Gen_2, \dots, Gen_n$ dan P_{Gi} adalah perhitungan output masing-masing unit DG.

3.3 Tes Performa Algoritma PFM-CSP dan PFM-OPF

Tujuan utama dari Power Flow Management adalah untuk mengatasi overload dan memaksimalkan daya output DG. Diperlukan tes performa (performance test) pada kedua algoritma power flow management, PFM-CSP dan PFM-OPF, untuk mengetahui kemampuan algoritma dalam melakukan mengatasi overload dan memaksimalkan daya output DG.

Pembentukan performance data set untuk merepresentasikan variasi network state, dilakukan dengan langkah sebagai berikut:

- Masing-masing network state direpresentasikan dengan Faktor Pengali total P_{DG} (FP_{DG}) dan Faktor Pengali total beban (FP_{Load}).
- FP_{DG} dan FP_{Load} dibentuk menggunakan variabel acak yang didapatkan dari distribusi seragam independen (*independent uniform distribution*)
- Variabel acak yang digunakan untuk menentukan FP_{DG} dan FP_{Load} ditunjukkan pada Lampiran B.
- 1000 network state diterapkan pada PFM-CSP dan PFM-OPF, sehingga dapat diketahui performa masing-masing algoritma dalam melakukan power flow management.

BAB 4

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan ditunjukkan hasil simulasi dari *power flow management* pada sistem distribusi aktif seimbang menggunakan algoritma PFM-CSP dan PFM-OPF. Pada bagian ini juga akan dibahas mengenai hasil simulasi aliran daya menggunakan metode *backward-forward sweep* pada sistem distribusi radial aktif seimbang, identifikasi fenomena overload, penerapan algoritma PFM-CSP dan PFM-OPF serta hasil tes performa kedua algoritma PFM tersebut.

4.1 Validasi Metode Backward-Forward pada Sistem Radial

Analisis aliran daya pada sistem distribusi dengan metode klasik (seperti newton raphson, dsb) tidak dapat menghasilkan nilai yang akurat karena perbedaan karakteristik antara saluran transmisi dan saluran distribusi. Salah satu alat atau *tool* yang dapat digunakan untuk melakukan analisis aliran daya pada sistem distribusi adalah *software* ETAP. Validasi metode *backward-forward sweep* diterapkan pada tes sistem IEEE 33 bus dengan penambahan 1 DG pada bus 18. Sistem ini memiliki topologi radial 1 fasa dengan beban seimbang. Validasi dilakukan untuk menguji tingkat keakuratan perhitungan dengan membandingkan nilai magnitud tegangan dan sudut tegangan. Pada Tabel 4.1 menjelaskan hasil simulasi MATLAB menggunakan metode *backward-forward sweep* (metode A) dan simulasi ETAP menggunakan metode *newton-raphson* untuk topologi radial (metode B).

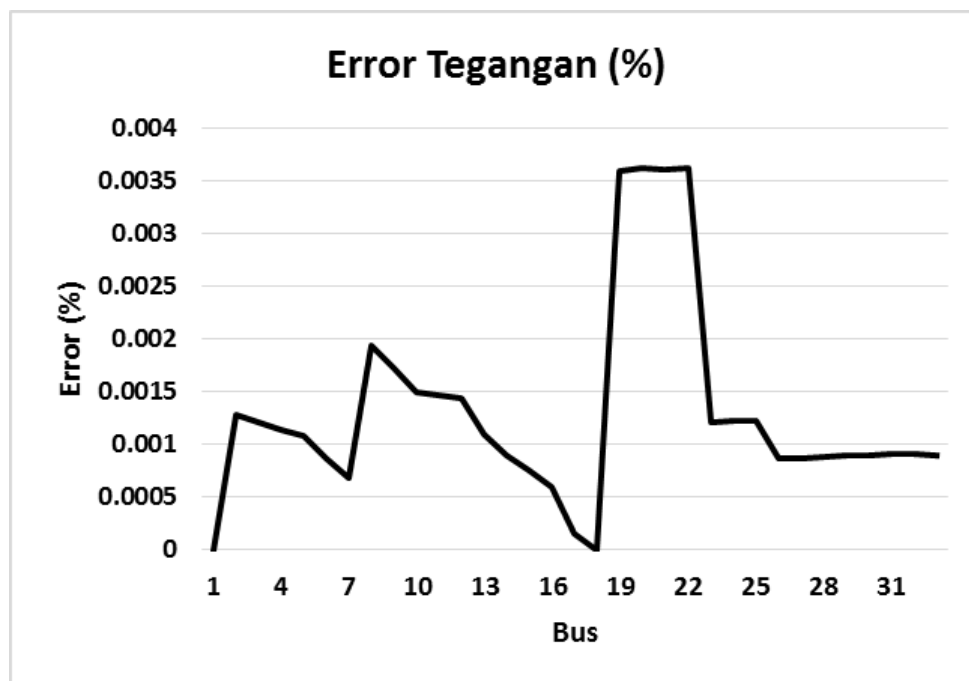
Tabel 4.1. Hasil Validasi Metode Backward Forward dengan ETAP

Bus	Tegangan			Sudut		
	MetodeA	MetodeB	Error	MetodeA	MetodeB	Selisih
1	12,6600	12,6600	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
2	12,6435	12,6434	0,0013	0,0807	0,0803	0,0004
3	12,5685	12,5683	0,0012	0,4952	0,4947	0,0005
4	12,5354	12,5353	0,0011	0,7747	0,7742	0,0005

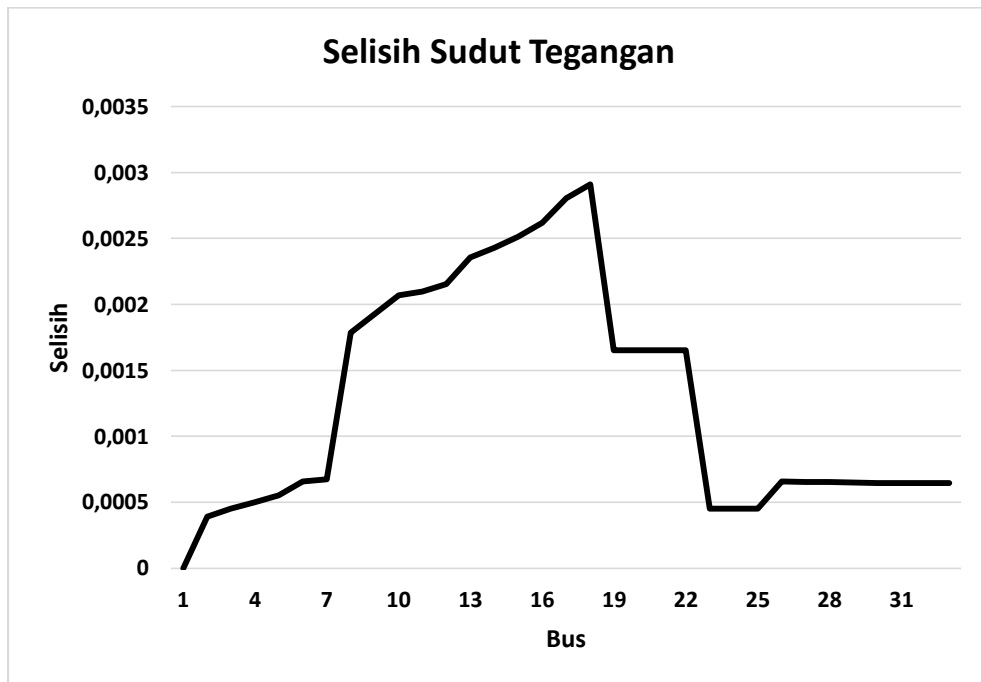
Bus	Tegangan			Sudut		
	MetodeA	MetodeB	Error	MetodeA	MetodeB	Selisih
5	12,5044	12,5042	0,0011	1,0605	1,0599	0,0006
6	12,3951	12,3950	0,0009	1,6828	1,6822	0,0007
7	12,3538	12,3537	0,0007	1,8886	1,8879	0,0007
8	12,3765	12,3763	0,0019	2,1901	2,1884	0,0018
9	12,3952	12,3950	0,0017	2,7163	2,7143	0,0019
10	12,4196	12,4194	0,0015	3,2452	3,2431	0,0021
11	12,4294	12,4293	0,0015	3,3206	3,3185	0,0021
12	12,4493	12,4491	0,0014	3,4608	3,4586	0,0022
13	12,4966	12,4965	0,0011	4,2224	4,2201	0,0024
14	12,5027	12,5025	0,0009	4,6019	4,5995	0,0024
15	12,5286	12,5285	0,0008	4,9194	4,9169	0,0025
16	12,5693	12,5692	0,0006	5,2764	5,2738	0,0026
17	12,6147	12,6146	0,0002	6,2013	6,1985	0,0028
18	12,6600	12,6600	0,0000	6,5619	6,5590	0,0029
19	12,6395	12,6391	0,0036	0,0813	0,0796	0,0017
20	12,6105	12,6100	0,0036	0,0804	0,0788	0,0017
21	12,6045	12,6041	0,0036	0,0767	0,0750	0,0017
22	12,5990	12,5986	0,0036	0,0717	0,0701	0,0017
23	12,5406	12,5404	0,0012	0,5169	0,5165	0,0005
24	12,4876	12,4874	0,0012	0,5394	0,5389	0,0005
25	12,4612	12,4611	0,0012	0,5511	0,5507	0,0005
26	12,3792	12,3791	0,0009	1,7374	1,7368	0,0007
27	12,3580	12,3579	0,0009	1,8131	1,8124	0,0007
28	12,2536	12,2535	0,0009	2,0320	2,0314	0,0007
29	12,1781	12,1780	0,0009	2,2040	2,2033	0,0006
30	12,1479	12,1478	0,0009	2,3322	2,3316	0,0006
31	12,1143	12,1142	0,0009	2,3331	2,3325	0,0006

Bus	Tegangan			Sudut		
	MetodeA	MetodeB	Error	MetodeA	MetodeB	Selisih
32	12,1066	12,1065	0,0009	2,3310	2,3304	0,0006
33	12,1040	12,1039	0,0009	2,3301	2,3295	0,0006
Rata-rata			0,001302	2,1736	2,1723	0,001275

Dari Tabel 4.1 di atas diketahui bahwa prosentase perhitungan error rata-rata magnitud tegangan sebesar 0,001% yang tinjukkan pada Gambar 4.1. Sedangkan selisih rata-rata sudut tegangan hasil perhitungan dan simulasi ETAP sebesar 0.001° yang ditunjukkan pada Gambar 4.2. Sehingga dapat ditarik kesimpulan bahwa metode *backward-forward sweep* sangat handal digunakan untuk menganalisis aliran daya oada sistem distribusi radial aktif seimbang dengan prosentase error dibawah 5%.



Gambar 4.1. Grafik %Error Magnitud Tegangan Hasil Perhitungan dan ETAP



Gambar 4.2. Grafik Selisih Sudut Tegangan Hasil Perhitungan dan ETAP

4.2 Identifikasi Fenomena Overload

Daya output DG yang bersumber dari energi terbarukan sangat dipengaruhi oleh ketersediaan sumber tersebut. Peningkatan dan penurunan ketersediaan sumber terbarukan juga berdampak pada daya semu yang mengalir pada tiap saluran. Fenomena overload pada saluran didefinisikan sebagai sebuah kejadian dimana nilai daya semu yang mengalir pada saluran antara bus i dan bus j , S_{ij} , melebihi nilai daya semu maksimal yang diijinkan, $S_{ij\max}$.

Analisis overload dilakukan pada tiga studi kasus yang ditrapkan pada sistem IEEE 33 bus dan IEEE 69 bus sebagai berikut:

Kasus satu : Analisis dilakukan pada sistem IEEE 33 bus dengan penambahan 1 DG pada bus 18 dengan kapasitas 2,4 MW dan pada sistem IEEE 69 bus dengan penambahan 1 DG pada bus 55 dengan kapasitas 2,1 MW

Kasus dua : Analisis dilakukan pada sistem IEEE 33 bus dengan penambahan 2 DG pada bus 18 dan 33 dengan masing-masing kapasitasnya 1,2 MW dan pada sistem IEEE 69 bus dengan penambahan 2 DG pada bus 55 dan 50 dengan masing-masing kapasitasnya 1,05 MW

Kasus tiga : Analisis dilakukan pada sistem IEEE 33 bus dengan penambahan 3 DG pada bus 18, 33 dan 30 dengan masing-masing kapasitasnya 0,8 MW dan pada sistem IEEE 69 bus dengan penambahan 3 DG pada bus 55, 50 dan 27 dengan masing-masing kapasitasnya 0,7 MW

Nilai oembangkitan daya DG yang bervariasi seiring dengan perubahan total beban pada sistem dapat menyebabkan terjadinya overload. Pada Tabel 4.2 menunjukkan fenomena overload yang terjadi akibat adanya peningkatan daya DG dan perubahan beban pada masing-masing studi kasus. Sebelum dilakukan *power flow management*, ketika terjadi peningkatan injeksi daya DG ke dalam sistem maka daya semu yang mengalir pada saluran juga meningkat, sehingga dapat menyebabkan overload. Fenomena overload dapat ditunjukkan melalui simulasi MATLAB maupun ETAP.

Tabel 4.2 Identifikasi Kondisi yang menyebabkan Overload

	Kasus 1	Kasus 2	Kasus 3
Kondisi awal	-	-	-
P _{DG} naik beban naik	√	√	√
P _{DG} turun beban turun	-	-	-

Tabel 4.3 menunjukkan kejadian overload yang dapat terjadi pada sistem IEEE 33 bus dan IEEE 69 bus. FP_{DG} dan FP_{load} diambil dari himpunan variabel acak seperti yang dijelaskan sebelumnya. Hal ini digunakan sebagai representasi kondisi sistem sesuai Tabel 4.2.

Tabel 4.3 Fenomena Overload pada Sistem IEEE 33 Bus dan IEEE 69 Bus

IEEE 33 Bus	Fenomena Overload						
FP. DG	0,8	0,8	0,8	1,3	1,5	0,8	0,3
FP. Load	0,5	1	1,5	0,5	0,6	0,1	0,1
Kasus 1	-	-	√	√	√	-	-
Kasus 2	-	-	√	-	-	-	-
Kasus 3	-	-	√	-	-	-	-

IEEE 69 Bus	Fenomena Overload						
FP. DG	0,8	0,8	0,8	1,3	1,5	0,8	0,3
FP. Load	0,5	1	1,5	0,5	0,6	0,1	0,1
Kasus 1	-	-	√	√	√	√	-
Kasus 2	-	-	√	√	√	√	-
Kasus 3	-	-	√	-	√	√	-

Penerapan algoritma *power flow* management menunjukkan bahwa daya output DG terpaksa harus dibatasi atau dikurangi untuk mengatasi fenomena overload pada sistem. Fenomena overload dapat membahayakan keamanan sistem, oleh karena itu sangat dibutuhkan sebuah algoritma *power flow management* yang mampu mengatasi overload dan memaksimalkan daya output DG. Pada penelitian ini PFM dilakukan melalui dua pendekatan yaitu metode Constraint Satisfaction Problem (PFM-CSP) dan Optimal Power Flow (PFM-OPF) .

4.3 Penerapan Algoritma PFM-CSP

Tabel 4.4 dan Tabel 4.5 menunjukkan hasil analisis overload dan total daya output DG pada sistem IEEE 33 bus dan pada sistem IEEE 69 bus setelah penerapan algoritma PFM-CSP, secara berurutan. Algoritma ini terbukti dapat menghilangkan overload saluran pada ketiga kasus yang telah didefinisikan sebelumnya. PFM-CSP yang digunakan dapat mengikuti perubahan total beban yang terjadi pada sejumlah *network states* yang direpresentasikan dengan FP_{DG} dan FP_{Load} .

Tabel 4.4 Hasil Penerapan Algoritma PFM-CSP pada Sistem IEEE 33 Bus

IEEE 33 Bus	Output DG (P_{DG})						
	PFM – Constraint Satisfaction Problem						
FP. DG	0,8	0,8	0,8	1,3	1,5	0,8	0,3
FP. Load	0,5	1	1,5	0,5	0,6	0,1	0,1
Kasus 1	-	-	1,44	2,34	2,7	-	-
Kasus 2	-	-	1,44	-	-	-	-
Kasus 3	-	-	1,44	-	-	-	-

Tabel 4.5 Hasil Penerapan Algoritma PFM-CSP pada Sistem IEEE 69 Bus

IEEE 69 Bus	Output DG (P_{DG})						
	PFM – Constraint Satisfaction Problem						
FP. DG	0,8	0,8	0,8	1,3	1,5	0,8	0,3
FP. Load	0,5	1	1,5	0,5	0,6	0,1	0,1
Kasus 1	-	-	1,680	1,310	2,520	0,323	-
Kasus 2	-	-	1,680	1,627	2,331	0,161	-
Kasus 3	-	-	1,680	-	2,302	0,269	-

4.4 Penerapan Algoritma PFM-OPF

Tabel 4.6 dan Tabel 4.7 menunjukkan hasil analisis overload dan total daya output DG pada sistem IEEE 33 bus dan pada sistem IEEE 69 bus setelah penerapan algoritma PFM-OPF, secara berurutan. Pada algoritma *Power Flow Management* (PFM) dengan pendekatan formulasi OPF, biaya pembangkitan masing-masing unit DG merepresentasikan urutan koneksi DG. DG dengan biaya tertinggi adalah DG yang paling akhir terkoneksi dengan sistem. Hal ini bertujuan untuk mensimulasikan prinsip koneksi *last-in first-out* (LIFO) pada masing-masing studi kasus.

Prinsip koneksi LIFO telah digunakan di beberapa negara sebagai skema koneksi DG dengan sumber energi terbarukan. Formulasi OPF dapat memaksimalkan daya output generator dan mengurangi overload saluran pada ketiga kasus yang telah didefinisikan sebelumnya.

Tabel 4.6 Hasil Penerapan Algoritma PFM-OPF pada Sistem IEEE 33 Bus

IEEE 33 Bus	Output DG (P_{DG})						
	PFM – Optimal Power Flow						
FP. Gen	0,5	1	1,3	1	1,3	1,3	0,5
FP. Load	0,5	0,5	0,5	0,1	0,3	1	0,1
Kasus 1	-	-	1,800	1,800	1,800	-	-
Kasus 2	-	-	1,878	-	-	-	-
Kasus 3	-	-	2,421	-	-	-	-

Tabel 4.7 Hasil Penerapan Algoritma PFM-OPF pada Sistem IEEE 69 Bus

IEEE 69 Bus	Output DG (P_{DG})						
	PFM – Optimal Power Flow						
FP. Gen	0,5	1	1,5	1	1,3	1,3	0,5
FP. Load	0,5	0,5	0,5	0,1	0,3	1	0,1
Kasus 1	-	-	2,1	2,023	2,1	0,455	-
Kasus 2	-	-	2,1	1,975	2,1	0,456	-
Kasus 3	-	-	2,1	-	2,1	0,455	-

4.5 Hasil Tes Performa Algoritma PFM-CSP dan PFM-OPF

Tes performa kedua algoritma *power flow management* dilakukan untuk mengetahui kemampuan masing-masing algoritma dalam mengatasi overload dan memaksimalkan output DG. Pada tes performa ini juga ditinjau waktu yang dibutuhkan untuk melakukan perhitungan hingga didapatkan solusi output daya DG yang maksimum.

Tes performa dilakukan pada 1000 network states yang direpresentasikan dengan FP_{DG} dan FP_{Load} seperti yang telah dijelaskan sebelumnya. Hasil tes performa algoritma PFM-CSP dan PFM-OPF dalam mengatasi overload dan memaksimalkan daya output DG pada sistem IEEE 33 bus ditampilkan pada Tabel 4.8. Sedangkan hasil tes performa dalam mengatasi overload dan memaksimalkan daya output DG pada sistem IEEE 69 bus ditunjukkan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.8 Hasil Tes Performa Algoritma PFM pada Sistem IEEE 33 Bus

Kasus 1		Kasus 1		Kasus 1	
No Algoritma		PFM-CSP		PFM-OPF	
Jumlah OL	369	Jumlah OL	0	Jumlah OL	0
P_{DG} (MW)	1789,9	P_{DG} (MW)	1321,48	P_{DG} (MW)	1396,03
Kasus 2		Kasus 2		Kasus 2	
No Algoritma		PFM-CSP		PFM-OPF	
Jum OL	89	Jum OL	0	Jum OL	79
P_{DG} (MW)	1789,9	P_{DG} (MW)	1302,08	P_{DG} (MW)	1576,06

Kasus 3		Kasus 3		Kasus 3	
No Algoritma		PFM-CSP		PFM-OPF	
Jum OL	87	Jum OL	0	Jum OL	0
P _{DG} (MW)	1789,9	P _{DG} (MW)	1789,9	P _{DG} (MW)	1626,47

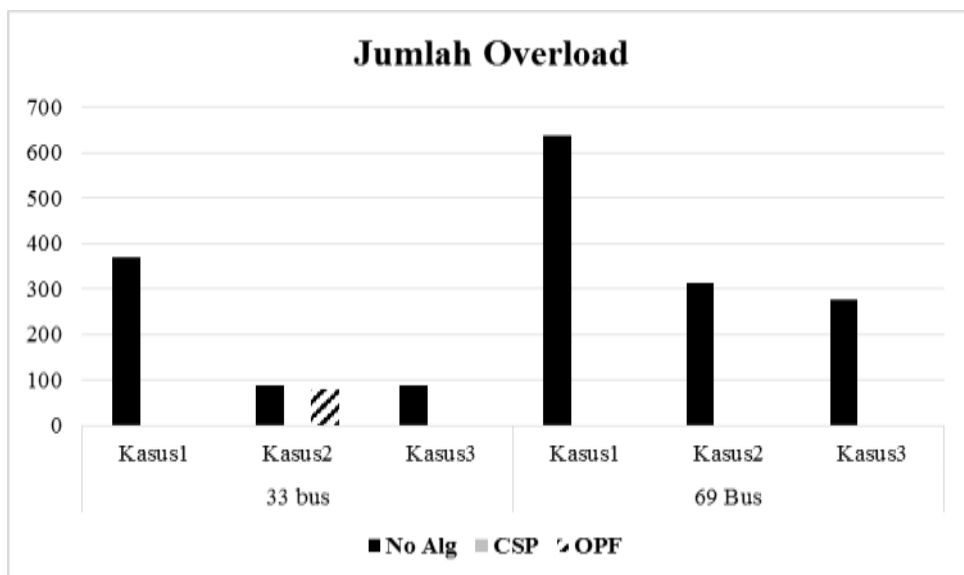
Tabel 4.9. Hasil Tes Performa Algoritma PFM pada Sistem IEEE 69 Bus

Kasus 1		Kasus 1		Kasus 1	
No Algoritma		PFM-CSP		PFM-OPF	
Jumlah OL	637	Jumlah OL	0	Jumlah OL	0
P _{DG} (MW)	2088,2	P _{DG} (MW)	1376,64	P _{DG} (MW)	1428,38

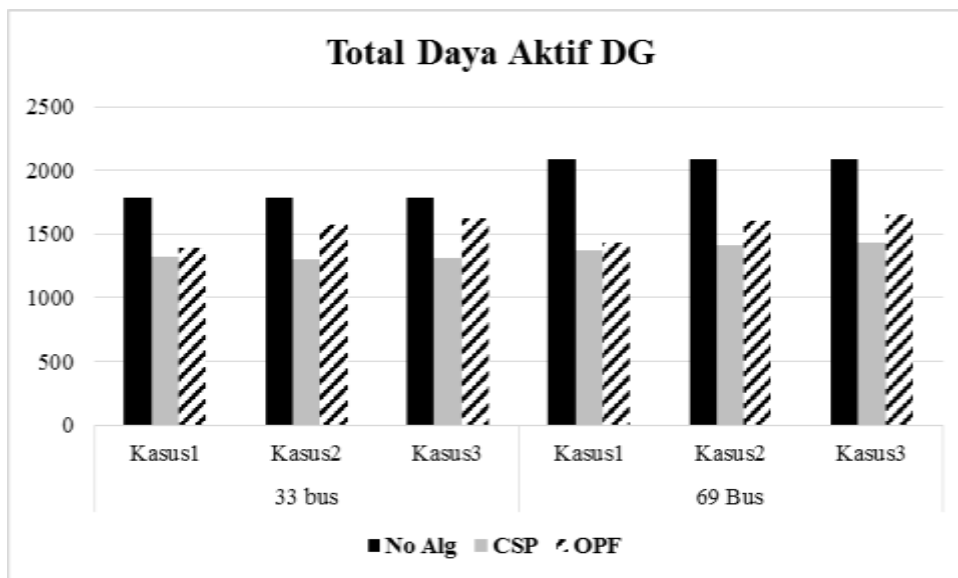
Kasus 2		Kasus 2		Kasus 2	
No Algoritma		PFM-CSP		PFM-OPF	
Jum OL	313	Jum OL	0	Jum OL	0
P _{DG} (MW)	2088,2	P _{DG} (MW)	1407,55	P _{DG} (MW)	1605,95

Kasus 3		Kasus 3		Kasus 3	
No Algoritma		PFM-CSP		PFM-OPF	
Jum OL	277	Jum OL	0	Jum OL	0
P _{DG} (MW)	2088,2	P _{DG} (MW)	1493,88	P _{DG} (MW)	1654,62

a. Performa Algoritma PFM-CSP dan PFM-OPF dalam Mengatasi Overload dan Memaksimalkan Daya Output DG



Gambar 4.3. Performa PFM-CSP dan PFM-OPF dalam Mengatasi Overload



Gambar 4.4. Performa PFM-CSP dan PFM-OPF dalam Memaksimalkan Output DG

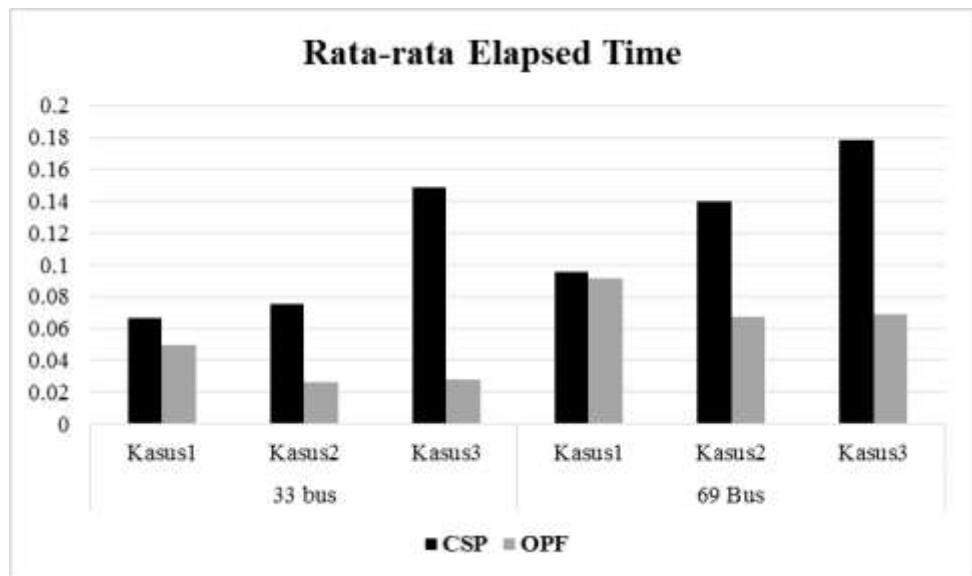
Tes performa yang dilakukan pada 1000 *network states* mampu menunjukkan bahwa *power flow management* dengan algoritma *optimal power flow* (OPF) lebih baik dalam mengatasi overload dan memaksimalkan output DG dibandingkan dengan algoritma *constraint satisfacton problem* (CSP). Hal ini menunjukkan bahwa metode *interior point solver* yang digunakan untuk melakukan *optimal power flow* lebih efektif dibandingkan dengan metode perhitungan manual pada algoritma *constraint satisfacton problem*.

Gamabar 4.3 menjelaskan bahwa jumlah overload yang terjadi sebelum dilakukan *power flow management*, grafik batang berwarna hitam solid, cukup besar pada ketiga studi kasus. Penerapan PFM-CSP mampu menghilangkan semua overload yang terjadi pada sistem IEEE 33 bus dan IEEE 69 bus. Sedangkan pada sistem IEEE 33 bus kasus ke-2, algoritma OPF tidak mampu mengatasi overload sebanyak 79 kejadian dari 1000 *network states*, yang ditunjukkan dengan grafik beatang berpola garis miring.

Grafik batang berwarna hitam solid pada Gambar 4.4 menunjukkan jumlah total daya output DG sebelum dilakukan pembatasan untuk mengatasi overload. Grafik batang berwarna abu-abu dan berpola garis miring menunjukkan total daya output setelah diterapkan PFM-CSP dan PFM-OPF, secara berurutan. Grafik tersebut menjelaskan bahwa walaupun overload tidak berhasil sepenuhnya diatasi

oleh algoritma PFM-OPF pada Studi Kasus kedua di sistem IEEE 33 bus, tetapi nilai daya DG yang dibangkitkan tetap lebih maksimal dibandingkan saat penggunaan algoritma PFM-CSP.

b. Waktu Komputasi yang dibutuhkan Algoritma PFM-CSP dan PFM-OPF dalam Mengatasi Overload



Gambar 4.5. Rata-rata waktu komputasi PFM-CSP dan PFM-OPF untuk Tiap *Network States*

Gambar 4.5 menunjukkan rata-rata waktu komputasi yang dibutuhkan oleh kedua algoritma PFM-OPF dan PFM-CSP untuk mengatasi overload. Dari grafik tersebut menjelaskan bahwa PFM-OPF membutuhkan waktu yang sangat singkat untuk menghasilkan solusi dibandingkan algoritma PFM-CSP. Hasil ini semakin memperkuat bahwa algoritma power flow management dengan formulasi OPF memiliki hasil yang lebih baik dalam mengatasi overload dan memaksimalkan daya output DG dibandingkan dengan algoritma PFM-CSP.

Halaman ini sengaja dikosongkan

BAB 5

KESIMPULAN

Setelah dilakukan analisis data dari hasil simulasi, maka diperoleh kesimpulan antara lain sebagai berikut:

1. Analisis aliran daya menggunakan metode *backward-forward sweep* sangat handal digunakan untuk menganalisis aliran daya pada sistem distribusi radial aktif seimbang dengan prosentase error dibawah 5%. Prosentase perhitungan error rata-rata magnitud tegangan sebesar 0,001% jika dibandingkan dengan hasil simulasi ETAP. Sedangkan selisih rata-rata sudut tegangan hasil perhitungan dan ETAP sebesar 0,001°.
2. Perbandingan performa algoritma PFM-CSP dan PFM-OPF dalam mengurangi overload dan memaksimalkan daya output DG dirangkum dalam Tabel 5.1

Tabel 5.1 Perbandingan Performa Algoritma PFM pada Sistem IEEE 33 Bus dan IEEE 69 Bus

Studi Kasus	IEEE 33 Bus			IEEE 69 Bus		
	Alg	OL	PDG (MW)	Alg	OL	PDG (MW)
1	No-Alg	369	1789,9	No-Alg	637	2088,2
	PFM-CSP	0	1321,5	PFM-CSP	0	1376,6
	PFM-OPF	0	1396,0	PFM-OPF	0	1428,4
2	No-Alg	89	1789,9	No-Alg	313	2088,2
	PFM-CSP	0	1302,1	PFM-CSP	0	1411,9
	PFM-OPF	79	1576,1	PFM-OPF	0	1605,9
3	No-Alg	87	1789,9	No-Alg	277	2088,2
	PFM-CSP	0	1311,1	PFM-CSP	0	1437,3
	PFM-OPF	0	1626,5	PFM-OPF	0	1651,1

PFM-OPF memiliki performa yang lebih baik dalam mengatasi overload dan memaksimalkan daya output DG dibandingkan dengan algoritma PFM-CSP.

3. PFM-OPF membutuhkan waktu yang sangat singkat untuk menghasilkan solusi dibandingkan algoritma PFM-CSP, dengan rata-rata waktu komputasi untuk keseluruhan kasus sebesar 55 ms.

Halaman ini sengaja dikosongkan

DAFTAR PUSTAKA

- Bacchus, F., 2010. *Constraint Satisfaction Problems*, Toronto: Department of Computer Science University of Toronto.
- Chang, G., Chu, S. & Wang, H., 2007. An Improved Backward/Forward Sweep Load Flow Algorithm for Radial Distribution Systems. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 22(2), pp. 882 - 884.
- Cheng T-H., d. Y. N.-C., 2009. Three-Phase Power-Flow by Direct Zbr Method for Unbalanced Radial Distribution Systems. *IET Gener.Transm.Distrib.*, 3(10), pp. 903-910.
- Dolan, M. et al., 2014. Reducing Distributed Generator Curtailment Through Active Power Flow Management. *Smart Grid, IEEE Transactions on*, 5(1), pp. 149 - 157.
- Gill, S., Kockar, I. & Ault, G., 2014. Dynamic Optimal Power Flow for Active Distribution Networks. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 29(1), pp. 121-131.
- James King, S. J. P. T., 2014. *The Potential of Network State-Based Algorithm Selection to Improve Power Flow Management*. National Harbor, MD, IEEE.
- Khushalani, S., Solanki, J. & Schulz, N., 2007. Development of Three-Phase Unbalanced Power Flow Using PV and PQ Models for Distributed Generation and Study of the Impact of DG Models. *Power Systems, IEEE Transactions on*, 22(3), pp. 1019 - 1025.
- Rice, J., 1976. The algorithm selection problem. *Adv. Comput*, Volume 15, p. 65–118.
- S.M. Moghaddas-Tafreshi, E. M., 2009. Distributed generation modeling for power flow studies and a three-phase unbalanced power flow solution for radial

distribution systems considering distributed generation. *Electric Power Systems Research*, 79(4), p. 680–686.

Saadat, H., 1999. *Power System Analysis*. New York: WCB McGraw-Hill.

LAMPIRAN

Data acak yang digunakan sebagai faktor pengali untuk merepresentasikan masing-masing network state ditunjukkan pada matriks berikut. Kolom pertama adalah FP_{DG} dan kolom kedua adalah FP_{Load}

Tabel L-A. Variabel Acak yang Merepresentasikan *Network States*

FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L
1,443	0,018	1,376	0,121	1,094	0,270	0,603	0,088	0,858	0,893
0,947	0,874	0,529	0,615	0,735	0,735	0,529	0,820	1,329	0,966
0,548	0,907	1,244	0,533	0,544	0,320	1,171	0,715	1,307	0,331
1,363	0,620	0,859	0,446	1,366	0,647	0,903	0,400	0,605	0,741
0,554	0,849	1,147	0,785	1,224	0,787	0,841	0,768	0,919	0,947
0,677	0,251	0,578	0,479	1,345	0,113	1,087	0,161	1,315	0,239
0,822	0,821	0,752	0,598	0,727	0,930	1,028	0,328	0,850	0,981
0,613	0,336	0,842	0,254	1,152	0,647	0,733	0,020	1,456	0,476
0,735	0,228	0,621	0,626	0,658	0,649	0,726	0,731	1,228	0,157
0,601	0,964	0,684	0,014	1,158	0,852	1,363	0,378	1,289	0,491
1,362	0,937	0,613	0,495	1,320	0,405	0,503	0,967	0,701	0,535
0,563	0,903	1,406	0,460	1,410	0,257	1,108	0,953	0,572	0,786
0,818	0,900	0,676	0,608	1,216	0,684	1,183	0,302	0,626	0,458
0,956	0,946	1,189	0,182	1,397	0,171	0,965	0,284	1,458	0,888
0,906	0,510	1,251	0,452	0,862	0,211	0,806	0,260	0,584	0,408
0,554	0,173	0,801	0,751	1,408	0,545	1,477	0,373	0,856	0,049
1,242	0,084	1,289	0,820	0,571	0,677	1,422	0,119	1,178	0,459
0,508	0,707	0,820	0,406	0,568	0,065	1,203	0,345	1,428	0,298
0,567	0,132	1,288	0,285	0,828	0,780	0,941	0,499	1,222	0,731
1,315	0,137	1,339	0,565	0,769	0,516	1,234	0,906	1,434	0,087
1,338	0,824	0,929	0,471	0,869	0,485	0,911	0,424	0,758	0,690
1,029	0,046	1,396	0,125	0,788	0,976	1,172	0,784	1,154	0,799
1,486	0,218	0,982	0,207	1,012	0,768	0,708	0,464	1,414	0,820
1,483	0,847	0,811	0,164	0,615	0,860	0,583	0,079	1,199	0,321
1,055	0,687	0,998	0,318	0,664	0,453	1,333	0,500	1,443	0,650
1,308	0,192	0,910	0,497	0,765	0,939	0,653	0,017	0,906	0,967
1,144	0,746	1,213	0,916	0,657	0,899	0,768	0,829	0,921	0,245
1,210	0,589	0,934	0,407	0,949	0,559	0,521	0,733	0,612	0,201
0,513	0,231	0,520	0,445	1,183	0,029	1,132	0,306	1,255	0,830
1,382	0,344	0,559	0,997	1,487	0,831	0,886	0,602	0,988	0,380
1,237	0,587	1,498	0,366	0,980	0,605	0,551	0,579	0,864	0,084
1,323	0,446	0,721	0,626	0,890	0,581	1,153	0,831	1,428	0,804
1,252	0,997	1,465	0,775	1,085	0,167	0,615	0,076	1,205	0,856
1,238	0,179	0,852	0,636	0,645	0,298	1,213	0,646	1,296	0,131

FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L
0,936	0,163	1,389	0,256	1,440	0,816	0,545	0,985	1,310	0,637
0,559	0,945	0,763	0,364	1,151	0,707	1,171	0,997	0,506	0,790
0,636	0,198	0,887	0,961	0,689	0,281	0,558	0,409	0,837	0,895
1,226	0,565	0,514	0,804	0,515	0,898	1,014	0,499	0,637	0,219
0,871	0,901	0,816	0,136	1,343	0,415	0,882	0,221	0,694	0,202
1,435	0,667	0,544	0,142	0,580	0,531	0,877	0,797	0,703	0,596
0,977	0,806	0,847	0,959	0,888	0,067	1,140	0,322	0,776	0,739
0,986	0,267	0,803	0,918	1,435	0,614	0,511	0,028	1,318	0,882
0,915	0,582	1,221	0,837	0,538	0,341	1,473	0,451	0,724	0,156
0,777	0,504	0,773	0,972	0,766	0,600	0,878	0,876	0,984	0,431
0,603	0,912	0,821	0,597	0,998	0,513	1,036	0,237	1,475	0,934
0,830	0,169	0,862	0,648	0,839	0,600	0,696	0,041	0,710	0,764
0,793	0,333	0,691	0,559	1,475	0,250	1,398	0,497	0,701	0,961
1,050	0,042	1,433	0,402	0,788	0,793	0,654	0,419	0,748	0,481
0,531	0,386	1,040	0,470	0,507	0,415	1,392	0,496	1,232	0,050
1,006	0,101	1,413	0,538	0,831	0,594	0,738	0,190	1,311	0,820
1,459	0,510	1,056	0,243	0,819	0,303	1,253	0,020	0,573	0,302
1,257	0,899	0,778	0,086	1,199	0,548	0,952	0,057	0,525	0,834
0,822	0,951	0,803	0,793	0,975	0,142	1,235	0,346	1,068	0,631
1,228	0,587	1,465	0,306	0,577	0,646	0,709	0,809	0,696	0,983
1,434	0,395	1,440	0,519	0,600	0,042	1,455	0,876	1,488	0,334
0,549	0,087	1,183	0,644	1,010	0,643	1,316	0,613	1,071	0,555
1,110	0,187	1,110	0,864	1,288	0,661	1,025	0,481	1,372	0,855
1,484	0,824	0,825	0,170	1,034	0,191	0,527	0,216	0,734	0,157
1,373	0,813	1,278	0,996	0,635	0,210	1,341	0,075	1,267	0,430
1,038	0,044	1,029	0,158	0,761	0,637	0,529	0,706	0,738	0,871
1,265	0,024	1,372	0,410	1,159	0,838	1,322	0,517	0,543	0,286
1,231	0,723	0,850	0,819	0,966	0,758	0,531	0,670	0,568	0,512
0,910	0,851	0,605	0,476	1,022	0,406	0,716	0,820	1,234	0,388
1,161	0,878	0,812	0,362	0,658	0,296	0,873	0,148	1,007	0,712
0,775	0,877	1,167	0,632	1,022	0,540	1,233	0,008	0,776	0,392
1,195	0,840	0,679	0,123	1,018	0,606	0,701	0,348	0,584	0,016
0,954	0,356	1,207	0,376	1,290	0,468	1,080	0,210	1,389	0,388
1,386	0,156	0,739	0,780	1,041	0,045	0,583	0,246	0,516	0,825
1,032	0,092	0,711	0,878	1,350	0,989	0,967	0,200	1,413	0,220
1,241	0,801	1,235	0,081	0,636	0,094	1,173	0,966	0,772	0,925
1,406	0,803	0,516	0,472	1,185	0,935	0,509	0,225	1,485	0,680
1,442	0,784	0,605	0,500	0,509	0,393	0,652	0,009	1,117	0,756
0,671	0,539	0,511	0,487	1,083	0,139	1,072	0,155	1,104	0,801
1,397	0,599	1,434	0,671	1,087	0,058	0,921	0,122	0,928	0,127
1,418	0,662	1,102	0,553	1,470	0,707	0,738	0,677	0,834	0,214
0,648	0,532	1,110	0,939	1,268	0,102	1,010	0,717	1,205	0,243

FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L
1,188	0,413	1,073	0,696	0,981	0,301	1,407	0,406	1,346	0,539
0,677	0,797	0,671	0,411	1,334	0,144	1,280	0,500	0,933	0,467
1,198	0,872	0,624	0,501	1,337	0,289	1,355	0,749	1,157	0,449
0,774	0,021	1,084	0,323	1,187	0,106	1,065	0,059	0,769	0,234
0,790	0,871	1,341	0,087	1,253	0,373	1,424	0,158	0,555	0,384
0,917	0,959	1,192	0,571	1,077	0,269	1,279	0,485	0,695	0,767
0,813	0,158	1,299	0,548	1,201	0,754	0,805	0,467	0,628	0,832
0,542	0,094	1,380	0,777	0,825	0,206	0,789	0,172	1,375	0,216
1,120	0,524	1,026	0,061	0,865	0,362	0,964	0,855	1,228	0,124
1,140	0,294	0,863	0,735	0,792	0,274	1,080	0,105	1,152	0,239
0,830	0,260	0,979	0,176	1,201	0,192	1,093	0,402	1,438	0,006
0,610	0,509	1,127	0,291	0,686	0,680	0,813	0,660	1,397	0,817
0,744	0,253	1,478	0,420	0,859	0,731	0,653	0,946	1,467	0,152
0,951	0,788	1,343	0,549	1,380	0,279	1,136	0,437	1,272	0,386
0,986	0,373	0,519	0,506	1,148	0,050	1,225	0,911	0,602	0,992
0,840	0,358	0,708	0,117	1,205	0,580	0,684	0,218	0,995	0,179
1,112	0,513	0,510	0,682	0,565	0,389	0,800	0,816	1,353	0,024
0,610	0,574	0,803	0,862	1,229	0,678	1,069	0,894	0,523	0,339
0,809	0,847	1,274	0,867	0,667	0,829	1,163	0,748	1,432	0,113
1,045	0,012	0,901	0,829	1,192	0,684	0,704	0,891	1,385	0,429
0,961	0,941	1,472	0,006	0,852	0,190	0,654	0,218	1,273	0,293
0,560	0,970	1,342	0,438	0,580	0,224	0,731	0,139	0,988	0,437
1,347	0,208	1,056	0,786	1,139	0,032	0,597	0,686	0,694	0,530
0,779	0,625	0,958	0,202	0,750	0,246	0,644	0,948	1,320	0,254
0,647	0,875	0,871	0,934	1,025	0,728	0,970	0,367	0,593	0,823
0,692	0,964	1,099	0,632	0,844	0,023	0,988	0,867	1,261	0,494
0,652	0,364	0,980	0,896	0,632	0,057	0,903	0,285	0,729	0,513
0,841	0,873	1,095	0,639	0,920	0,359	1,475	0,603	1,234	0,470
1,244	0,888	0,877	0,805	1,152	0,737	1,307	0,709	1,019	0,192
1,380	0,794	1,454	0,977	0,883	0,091	0,994	0,083	1,281	0,824
1,244	0,215	1,438	0,493	1,005	0,060	0,600	0,711	0,805	0,665
0,577	0,183	0,711	0,520	0,823	0,578	0,540	0,535	0,712	0,958
0,610	0,114	0,681	0,774	1,004	0,978	0,738	0,696	0,562	0,548
0,976	0,945	1,290	0,736	1,425	0,086	1,321	0,045	0,913	0,786
0,957	0,626	1,302	0,241	1,347	0,782	1,434	0,549	0,543	0,099
1,069	0,803	0,758	0,779	1,078	0,350	0,558	0,043	0,654	0,458
0,914	0,674	1,099	0,200	0,774	0,341	0,908	0,767	1,066	0,581
1,088	0,874	1,191	0,612	1,432	0,213	1,276	0,724	1,207	0,460
0,598	0,476	1,196	0,009	1,245	0,807	1,215	0,499	0,707	0,181
0,695	0,485	0,639	0,511	1,046	0,462	1,208	0,074	1,380	0,690
1,125	0,181	0,786	0,492	0,830	0,388	1,296	0,859	1,439	0,247
1,125	0,786	1,047	0,126	0,941	0,978	0,600	0,077	0,579	0,458

FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L
1,011	0,831	1,351	0,234	1,020	0,631	0,816	0,588	0,659	0,712
1,190	0,314	1,109	0,553	0,995	0,185	1,052	0,904	1,044	0,220
0,905	0,153	1,154	0,917	0,782	0,097	1,003	0,912	1,270	0,494
0,573	0,568	1,102	0,146	1,190	0,376	0,641	0,933	0,611	0,500
0,933	0,682	0,907	0,499	1,337	0,485	0,614	0,943	0,890	0,611
1,069	0,175	1,250	0,218	0,576	0,071	1,224	0,575	0,611	0,434
0,596	0,872	1,285	0,580	0,743	0,752	1,296	0,455	1,212	0,526
1,090	0,856	1,140	0,247	1,217	0,965	0,920	0,470	1,063	0,649
1,200	0,460	0,791	0,620	0,739	0,007	1,210	0,496	0,735	0,498
0,648	0,356	1,078	0,891	1,410	0,505	1,204	0,964	1,396	0,133
0,869	0,642	0,713	0,575	1,432	0,753	1,292	0,750	1,221	0,425
0,673	0,654	1,106	0,095	1,160	0,146	1,159	0,934	0,804	0,454
1,318	0,444	0,647	0,217	1,153	0,806	1,456	0,495	0,593	0,254
1,333	0,535	0,967	0,948	0,988	0,573	1,156	0,260	1,108	0,285
1,330	0,949	0,806	0,736	1,075	0,911	0,771	0,974	1,433	0,877
1,308	0,066	1,409	0,033	0,844	0,433	1,303	0,148	0,853	0,264
0,837	0,903	0,736	0,798	0,876	0,085	1,075	0,490	1,067	0,551
0,911	0,625	1,436	0,017	0,963	0,041	1,263	0,139	1,049	0,201
0,635	0,614	1,496	0,804	1,343	0,642	0,654	0,892	1,094	0,018
0,849	0,086	0,842	0,627	0,688	0,943	1,383	0,718	0,692	0,055
1,131	0,945	0,751	0,661	0,684	0,167	1,418	0,986	1,322	0,126
1,148	0,726	0,892	0,201	1,435	0,837	1,149	0,125	1,390	0,409
1,115	0,230	1,347	0,650	1,432	0,940	1,184	0,763	0,567	0,614
0,723	0,111	1,431	0,600	0,505	0,973	0,541	0,761	0,600	0,329
1,029	0,350	0,751	0,939	0,758	0,610	1,438	0,714	0,860	0,086
1,159	0,794	1,081	0,589	1,316	0,550	1,265	0,379	0,872	0,503
1,185	0,960	1,421	0,690	1,345	0,380	1,385	0,341	0,604	0,895
1,025	0,024	1,315	0,059	1,347	0,813	0,595	0,946	1,263	0,751
0,743	0,366	1,122	0,797	0,706	0,062	1,180	0,678	1,303	0,493
0,676	0,091	0,943	0,434	1,384	0,779	0,602	0,864	1,037	0,661
1,209	0,257	1,265	0,394	1,222	0,391	1,382	0,052	1,142	0,064
0,813	0,289	0,556	0,344	0,632	0,534	1,147	0,588	0,570	0,205
0,774	0,753	1,028	0,394	0,881	0,399	1,483	0,605	0,805	0,213
1,442	0,989	1,063	0,492	0,665	0,908	1,459	0,386	1,021	0,240
1,451	0,303	1,140	0,990	1,416	0,209	1,330	0,696	0,603	0,637
0,956	0,939	1,186	0,165	0,629	0,179	0,624	0,601	0,749	0,835
1,024	0,896	0,631	0,114	0,563	0,141	0,695	0,380	1,048	0,469
0,968	0,151	1,213	0,504	0,930	0,962	0,697	0,622	1,279	0,573
0,779	0,598	1,102	0,345	1,264	0,182	1,113	0,202	0,939	0,485
1,185	0,886	0,634	0,869	1,385	0,228	0,838	0,868	0,773	0,030
1,234	0,366	0,943	0,782	0,527	0,986	0,667	0,719	1,136	0,427
0,794	0,117	0,983	0,379	1,431	0,627	0,815	0,971	0,819	0,142

FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L	FP_{DG}	FP_L
1,272	0,265	1,189	0,753	1,092	0,722	0,651	0,602	0,536	0,974
1,181	0,449	0,721	0,044	1,334	0,478	0,999	0,450	0,826	0,221
1,223	0,639	0,576	0,652	0,506	0,186	1,295	0,092	0,908	0,209
1,213	0,555	0,821	0,683	0,595	0,124	1,472	0,988	0,989	0,834
1,498	0,144	1,180	0,192	1,229	0,743	0,679	0,395	0,712	0,122
1,456	0,442	1,106	0,439	1,426	0,071	1,414	0,801	0,804	0,021
0,978	0,959	1,444	0,226	1,270	0,080	0,674	0,422	1,411	0,370
1,132	0,002	1,003	0,322	0,790	0,635	1,158	0,381	1,153	0,180
0,978	0,831	1,204	0,478	0,737	0,656	1,030	0,437	0,642	0,162
1,421	0,341	0,603	0,886	0,913	0,772	0,699	0,692	0,677	0,341
0,563	0,467	0,787	0,656	0,839	0,064	1,439	0,282	1,172	0,030
1,013	0,463	0,965	0,279	0,878	0,378	1,001	0,536	0,562	0,095
1,117	0,837	0,830	0,933	0,861	0,903	0,984	0,690	1,099	0,171
0,921	0,699	1,172	0,077	1,259	0,061	0,520	0,522	0,558	0,590
0,549	0,933	0,810	0,517	1,180	0,993	0,818	0,606	1,087	0,872
0,764	0,704	0,648	0,680	0,912	0,267	0,945	0,698	0,962	0,363
0,982	0,626	0,536	0,483	0,645	0,299	0,776	0,323	1,200	0,646
1,005	0,238	1,075	0,565	0,838	0,721	1,255	0,461	0,592	0,017
1,083	0,455	0,656	0,477	0,600	0,057	1,308	0,069	1,499	0,073
1,171	0,689	0,865	0,232	1,038	0,618	1,392	0,893	1,353	0,230
1,268	0,055	1,459	0,862	1,048	0,798	1,118	0,894	0,804	0,099
0,753	0,627	0,727	0,132	1,208	0,638	0,750	0,438	0,773	0,292
1,325	0,151	1,383	0,928	1,429	0,327	0,559	0,038	0,571	0,721
1,450	0,475	0,522	0,625	1,289	0,215	1,183	0,196	0,885	0,391
1,131	0,913	1,444	0,637	1,037	0,600	0,851	0,327	1,315	0,154
1,235	0,368	0,894	0,193	1,000	0,937	0,658	0,559	1,397	0,871
1,113	0,480	0,993	0,456	0,572	0,972	1,427	0,131	1,128	0,967
1,172	0,329	0,715	0,537	0,663	0,766	1,085	0,337	0,641	0,747
0,973	0,118	1,359	0,899	1,270	0,833	0,557	0,351	1,214	0,145
0,634	0,634	0,878	0,286	1,202	0,959	0,560	0,084	0,940	0,749
0,523	0,250	1,227	0,239	1,463	0,373	1,063	0,912	0,836	0,195
1,212	0,146	0,888	0,340	1,220	0,052	0,658	0,892	0,976	0,420
1,441	0,998	1,072	0,403	1,330	0,989	0,547	0,666	1,358	0,840
0,624	0,213	1,436	0,046	1,064	0,730	0,877	0,845	0,648	0,989
0,943	0,365	1,383	0,965	0,826	0,496	1,353	0,785	1,457	0,579
1,123	0,766	0,580	0,822	0,899	0,696	0,549	0,483	0,645	0,577
0,947	0,134	1,013	0,141	1,192	0,328	1,365	0,082	0,729	0,455
1,042	0,646	1,087	0,016	0,683	0,816	0,972	0,405	0,884	0,880
1,182	0,065	1,445	0,863	1,223	0,834	1,162	0,055	1,087	0,574
1,059	0,411	0,905	0,384	1,085	0,523	0,674	0,085	1,213	0,890

Halaman ini sengaja dikosongkan

BIOGRAFI PENULIS



Nuha Nadhiroh dilahirkan pada tanggal 24 Juli 1990 di Malang-Jawa Timur, merupakan anak pertama dari pasangan Imam Mashudi BEng (HONS), MT. dan Dra. Yetti Indrawati. Saat ini penulis telah memiliki keluarga kecil dan dikaruniai seorang putra. Riwayat pendidikan penulis adalah MIN Malang 1 (1996 – 2002), MTsN Malang 1 (2002-2005), SMAN 1 Malang (2005-2008) dengan penjurusan Ilmu Alam, S1 Teknik Sistem Tenaga Teknik Elektro Universitas Brawijaya (2008 – 2012). Memiliki pengalaman bekerja selama 2 (dua) tahun (2012-2014) sebagai *analyst service operation* di PT. Trakindo Utama Area Kalimantan. Selama menempuh pendidikan sarjana, penulis aktif melakukan penelitian sebagai asisten laboratorium mesin elektrik. Selama menempuh pendidikan magister, penulis adalah penerima beasiswa (awardee) LPDP angkatan PK ke-24 dan melakukan penelitian di laboratorium Simulasi Sistem Tenaga Listrik. Saran dan kritik mengenai penelitian ini dapat disampaikan ke alamat email: nuhanadhiroh@gmail.com.